



**Терентьєв О.М., Клещов А.Й., Гонтарь П.А., Тверда О.Я.**

# **РЕЗОНАНСНЕ ЕНЕРГООЩАДНЕ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**ТОМ 1**

**ОБЕРТОВЕ МАГНІТО-ГІДРОДИНАМІЧНЕ  
КАВІТАЦІЙНЕ РУЙНУВАННЯ ВИБОЇВ**

Монографія

Рекомендовано Вченою радою Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Київ – 2018

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»  
(протокол № 5 від 14 травня 2018)

За повного або часткового відтворення матеріалів даної публікації  
посилання на видання обов'язкове

**Рецензенти:**

**Бойко В.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач науково-дослідної лабораторії з проблем сейсмічної безпеки технологічних вибухів Інституту гідродинаміки НАН України.

**Садовенко І.О.** – доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України, професор кафедри гідрогеології та інженерної геології Національного гірничого університету МОН України.

**Відповідальний редактор:**

**Ткачук К.К.** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Р 34 Резонансне енергоощадне руйнування гірських порід: монографія / Том 1. **Обертове магніто-гідродинамічне кавітаційне руйнування вибоїв.** [Текст] / О.М. Терентьєв, А.Й. Клещов, П.А. Гонтарь, О.Я. Тверда – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 149 с.

ISBN 978-617-7185-22-1

Запропоновано новий комбінований енергозберігаючий обертовий магніто-гідродинамічний кавітаційний спосіб руйнування гірських порід. Спосіб забезпечує магніто-індукційне фокусування кавітаційного потоку. Для практичної реалізації нового способу створено - різець кавітаційний, патент UA № 101946, МПК E21B 7/18. В монографії надані результати вирішення наукового і прикладного завдання зниження енергоємності руйнування на 11%. Це досягнуто за допомогою внесення штучної дефектності від схлопування кавітаційних каверн та зниження питомої поверхневої енергії гірських порід для гнейсу з 43,0 Дж/м<sup>2</sup> до 39,5 Дж/м<sup>2</sup> та для граніту з 52,4 Дж/м<sup>2</sup> до 48,7 Дж/м<sup>2</sup>.

Розроблені та апробовані математичні моделі: питомої поверхневої енергії гірських порід, яка відрізняється від відомих тим, що дозволяє врахувати: магнітну індукцію, довжину дифузору різця кавітаційного, діаметр, масу структурних частинок гірських порід, їх питому теплоту плавлення та густину; енергоємності руйнування гірських порід, яка відрізняється від відомих тим, що враховує питому поверхневу енергію.

ISBN 978-617-7185-22-1

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	8
1.1. Аналіз з використанням теорії графів.....	8
1.2. Кавітаційні процеси як додаткове джерело енергії.....	17
1.3. Критерії руйнування гірських порід.....	19
1.4. Математичні моделі питомої поверхневої енергії.....	24
Висновки .....	29
РОЗДІЛ 2. КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	30
2.1. Планування аналітичних та експериментальних досліджень.....	30
2.2. Стенд для досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід.....	34
2.3. Програма експериментальних досліджень.....	39
2.4. Методика статистичного аналізу .....	44
Висновки .....	48
РОЗДІЛ 3. КЕРУВАННЯ ПИТОМОЮ ПОВЕРХНЕВОЮ ЕНЕРГІЄЮ.....	49
3.1. Базові параметри, що визначають питому поверхневу енергію.....	49
3.2. Енергоємність руйнування гірських порід.....	62
3.3. Геометричні та частотні параметри кавітаційної зони.....	69
Висновки .....	71
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТОМОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД .....	73
4.1 Вибір і підготовка зразків гірських порід.....	73
4.2. Стенд для встановлення залежності питомої поверхневої енергії від дії магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження.....	80

4.3. Умови виникнення кавітації.....	82
4.4. Вплив магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження на модуль пружності I роду гірських порід .....	85
4.5. Локальні дефекти гірських порід до та після навантажень.....	98
4.6. Зміна питомої поверхневої енергії під дією магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження.....	104
4.7. Енергоємність руйнування зі зміною питомої поверхневої енергії.....	107
4.8. Рівняння регресії питомої поверхневої енергії.....	111
Висновки .....	115

РОЗДІЛ 5. ПРОМИСЛОВА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБЕРТОВОГО МАГНІТО-ГІДРОДИНАМІЧНОГО КАВІТАЦІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД.....	116
---	-----

5.1. Умови промислової реалізації.....	116
5.2. Енергоємність руйнування традиційним обертовим та обертовим магніто-гідродинамічним кавітаційним способами.....	120
5.3. Економічна ефективність промислового впровадження.....	124
5.4. Техніка безпеки та правила експлуатації.....	127
Висновки .....	129

ЗАКЛЮЧЕННЯ .....	130
------------------	-----

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	132
---------------------------------	-----

ДОДАТОК А. Акт впровадження обертового магніто-гідродинамічного кавітаційного способу руйнування гірських порід.....	148
--	-----

## ВСТУП

Руйнуванням гірських порід (ГП), удосконаленням старих і розробкою нових способів займалися: В. В. Бойко, В. І. Бондаренко, В. І. Брилін, В. Л. Бритаєв, О. О. Вовк, В. Д. Воробйов, Ю. В. Горюнов, С. М. Журков, В. Г. Кравець, Ф. І. Кучерявий, В. З. Партон, Н. С. Ремез, О. О. Скочинський, О. М. Терпигорьєв, Л. Д. Шевяков, Є. І. Шемякін та інші. На сьогодні основним серед способів руйнування ГП є вибуховий. Одним із найважливіших аспектів, від якого залежить ефективність руйнування ГП даним способом є етап підготовки масиву до вибуху. Він включає створення вибухових шпурів та свердловин. До цього часу у вітчизняній гірничій промисловості використовують способи руйнування, що мають високу питому енергоємність в декілька тисяч МДж/м<sup>3</sup>: гідравлічний, електротермічний, плазмовий, термошаршковий тощо. Способи руйнування, що потребують меншої енергоємності, також мають ряд недоліків: використання механічного - обмежене міцністю ГП до 6 за шкалою Протодяконова, вибухового – супроводжується утворенням сейсмічних хвиль, забрудненням довкілля. То ж, до сьогодні задача розробки енергозберігаючого обладнання для руйнування ГП залишається актуальною.

Аналіз теорій руйнування ГП Бонда, Ірвіна, Кірпічова Кулона-Мора, Орована, Треска, Пранталя, Ребіндера, Рітінгера, Шлейхера та інших показав, що вони базуються на механіці суцільних середовищ та не враховують молекулярну будову ГП. Наявність вказаних недоліків призводить до збільшення енерговитрат і зниження ККД.

Створення нового математичного апарату та його практична апробація, дозволяє врахувати технологічні та фізико-механічні показники руйнування ГП. Для цього розглянуто руйнування ГП від дії сукупності внутрішніх та зовнішніх навантажень на молекулярному рівні. Це є актуальною науково-технічною задачею.

Дослідження виконано відповідно до «Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року» (Закон України від 21 квітня 2011 року № 3268-VI). Задачі досліджень узгоджувалися з "Переліком державних наукових і науково-технічних програм з пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки.", затвердженому Кабінетом Міністрів України від 24 грудня 2001 р. № 1716 та науковою програмою «Енергоефективність та енергозбереження» на період до 2017 року, №152 від 25.02.2009 року.

В роботі досліджувалося зниження енергоємності руйнування ГП зміною їх питомої поверхневої енергії (ППЕ) при обертово-магніто-гідрокавітаційному навантаженні. Основними завданнями визначенні:

1. Отримати і проаналізувати залежності зміни ППЕ ГП від магнітної індукції та геометрії дифузора кавітатора.

2. Встановити закономірності зміни енергоємності руйнування від ППЕ ГП.

3. Визначити залежності зміни енергоємності процесу руйнування при магніто-гідродинамічному кавітаційному (МГК) навантаженні від магнітної індукції у дифузори кавітатора.

4. Обґрунтувати робочий режим руйнування ГП при МГК навантаженні.

Наукова новизна представлених наукових положень і полягає у тому, що вперше:

1. Отримано залежності ППЕ руйнування ГП: поліноміальна від магнітної індукції в діапазоні від 15 мТл до 45 мТл та спадна гіперболічна від довжини дифузору кавітатора робочого інструменту від 10 мм до 50 мм та куті його розкриття  $60^0$ .

2. Встановлено закономірність енергоємності руйнування від ППЕ при обертовому магніто-динамічному гідрокавітаційному (ОМГК) навантаженні, яка спадає за логарифмічним законом: для гнейсу з 61 кВт·год/м<sup>3</sup> до 57 кВт·год/м<sup>3</sup> та для граніту з 73 кВт·год/м<sup>3</sup> до 68 кВт·год/м<sup>3</sup> при зниженні ППЕ гнейсу з 42.99 Дж/м<sup>2</sup> до 39.53 Дж/м<sup>2</sup> та граніту з 52.43 Дж/м<sup>2</sup> до 48.71 Дж/м<sup>2</sup>.

3. Визначено, що при ОМГК навантаженні питома енергоємність знижується за поліноміальним законом при зміні магнітної індукції від 0 до 45 мТл.

4. Дістало подальшого розвитку обґрунтування режиму МГК навантаження при магнітній індукції - 15 мТл, куті розкриття дифузора -  $60^0$  з довжиною 30 мм, для забезпечення зростання кількості локальних дефектів до 20 одиниць на  $1 \text{ мм}^2$ , з середньою довжиною, шириною і глибиною відповідно 100, 10 і 5 мкм.

Практичними досягненнями є: розроблена інженерна методика розрахунку енергоємності руйнування від магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора робочого інструменту при руйнуванні ГП з МГК навантаженням, яка дозволяє знизити енергоємність руйнування на (6...10) % для пружно-крихких ГП і використана в умовах Товкачівського гірничо-збагачувального комбінату; підготовка рекомендації значень параметрів руйнування ГП з додатковим МГК навантаженням: магнітна індукція 15 мТл, довжина дифузору кавітатора робочого інструменту 0.03 м та кут розкриття  $60^0$ ; практична реалізація ОМГК способу руйнування ГП та інструменту для його реалізації, що захищений патентом України UA №101946 МПК E21B 7/18.

Використання розробленого фокусування кавітаційного потоку постійним магнітним полем дозволило подовжити термін експлуатації робочого інструменту.

Основні положення роботи використано у навчального процесі для студентів гірничих спеціальностей інституту енергозбереження та енергоменеджменту, КПП ім. Ігоря Сікорського.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ СПОСОБІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

#### 1.1. Аналіз з використанням теорії графів

Способи руйнування ГП поділяються на: механічні, гідравлічні, вибухові, фізичні та хімічні [1].

**Механічний спосіб** використовується на 85 % усіх гірничих і земляних роботах [2] поділяється на ударний та обертовий. Серед комбінованих механічних способів виділяють ударно-обертовий та обертово-ударний. Витрати енергії на одиницю об'єму знаходяться в межах (0.7...6.1) МДж/м<sup>3</sup> [3]. Недоліком способу є обмежена область його ефективної роботи - для ГП з коефіцієнтом міцності за шкалою проф. Протодяконова до 6. Для ГП з більшим коефіцієнтом міцності необхідна заміна матеріалу інструменту зі сталі на вольфрам-кобальтові сталі, алмаз, боразон тощо [4].

**Гідравлічний спосіб руйнування** ГП передбачає використання напірного струменю води при тисках від кількох одиниць МПа до декількох сотень МПа [5] (гідромоніторний). Для підвищення ефективності руйнування ГП у струмінь води додають (5...15) % абразивних часток - сталевий дріб, кварцовий пісок тощо. За характером струменю виділяють імпульсний та безперервний. Цей спосіб застосовують при руйнуванні вертикально розміщених, по відношенню до горизонту, масивів ГП. Енергоємність гідравлічного способу руйнування знаходиться в межах (1000...2000) МДж/м<sup>3</sup> [3].

**Вибуховий спосіб руйнування** оснований на процесі фізичного або хімічного перетворення вибухової речовини. Супроводжується переходом потенціальної енергії в кінетичну з різким підвищенням тиску в оточуючому середовищі, виникненням ударної хвилі та поля напружень [4].



Переваги:

- швидкий перебіг процесу руйнування (наприклад, по заряду з 1 кг гексогену, об'єм якого  $0.6 \text{ дм}^3$ , а теплота вибуху  $5.4 \text{ МДж/кг}$ , час детонації -  $1 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ , що відповідає потужності  $500 \text{ кВт}$  [6]).

Недоліки:

- сейсмічна дія вибуху на законтурний масив, його порушення і ослаблення;

- забруднення довкілля, у результаті вибуху;

- витрати на додаткову обробку поверхонь монолітних блоків;

- утворення газоподібних речовин обсяг яких у (2000...4000) разів перевищує обсяг заряду вибухової речовини [7].

Енергоємність вибухового способу руйнування знаходиться в межах  $(200 \dots 950) \text{ МДж/м}^3$  [3].

**Фізичні способи руйнування ГП:** термічні, електричні, ультразвукові.

До термічних способів руйнування ГП відносяться: вогневий, плазмовий, атомний, циклічний, лазерний, електронно-променевий. Енергія теплового потоку перетворюється ГП в механічну роботу, яка викликає руйнування ГП. До електричних способів руйнування ГП відносяться: електродуговий, електронагрівальний, електроіндукційний. Енергія електромагнітного та електричного полів перетворюється в ГП спочатку в теплову, а потім у механічну роботу.

Перевагами фізичних способів руйнування ГП є те, що в них відсутній породоруйнуючий інструмент. Це важливо при підвищенні міцності руйнування ГП у зв'язку з різким зниженням стійкості інструменту і збільшенням можливості його зносу.

Високочастотним способом руйнування ГП є резонансний на основі використання надвисоких частот – випромінювання. Їх діапазон знаходиться в межах  $(3 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^5) \text{ МГц}$ . При цьому довжини хвиль у повітрі, відповідно, змінюються в межах  $(1 \dots 0,001) \text{ м}$  [7]. При застосуванні даного способу руйнування в масив вводиться електромагнітна хвиля. З протилежного боку,

перпендикулярно до напрямку дії випромінювача, ставиться екран. У результаті, пряма та відбита хвилі накладаються і утворюється резонанс. Енергоємність руйнування (3 – 7) МДж/м<sup>3</sup>, продуктивність 30 м<sup>3</sup>/год [7]. Даний спосіб руйнування доцільно використовувати для діелектричних ГП, наприклад, граніт або вапняк. Недоліком є те, що максимальна товщина шару масиву, що руйнується 0,5 м.

Електротермічний височастотний спосіб передбачає нагрів масиву під дією електромагнітного поля. При цьому виникають зони теплового розширення в яких з'являються розтягуючі напруження. Це призводить до появи тріщин. Електромагнітна установка генерує поле частотою 5.28; 13.56; 27.12 МГц [7], дозволених для промислового застосування. Дані частоти достатні для руйнування тіла таких діелектричних ГП, як граніт, вапняк, сієніт, гнейс. Енергоємність руйнування (7...13) МДж/м<sup>3</sup>, продуктивність знаходиться в межах від 25 до 50 м<sup>3</sup>/год [7].

**Електроімпульсний спосіб (електровибух)** полягає у короткочасній, 1 мс, розрядно-імпульсній дії у рідині, що знаходиться в масиві. У результаті, викликає появу механічних руйнуючих напружень [7].

Переваги електроімпульсного способу: відсутність пило-газоутворення, відсутність розльоту шматків оброблюваного масиву, можливість руйнування заданих обсягів в локальній площині, що зменшує втрати сировини при обробці. Енергоємність руйнування (100...200) МДж/м<sup>3</sup> [3].

**Хімічний спосіб руйнування.** Під час руйнування ГП хімічним способом використовується спеціальна суміш – терміт. Руйнування ГП відбувається в результаті їх нагрівання під час згоряння терміта на поверхні ГП, або в шпурі, пробуреного на глибину (0.1...0.4) м. Витрата терміту при руйнуванні міцних ГП становить (0.8...1.2) кг на 1 м<sup>2</sup> новоствореної поверхні [3]. Відбір проб даним способом здійснюється з використанням вже існуючих тріщин або шпурів, в які засипається порошок або закладаються брикети. За експериментальними даними температура горіння терміта досягає (2773...3273) К на 1 кг речовини [3]. Перевагою застосування терміту, в

порівнянні з вибуховим способом, є зниження собівартості руйнування ГП на (30...40) % [3].

Крім терміту, серед хімічних речовин використовують поверхнево-активні речовини (ПАР). Використання ПАР у якості промивної рідини дозволяє підвищити швидкість буріння на (20...50) %, знизити зношування та затуплення бурового інструменту у (1.5...2.2) рази та зменшити запиленість шахтної атмосфери у (2.0...3.7) рази [8].

Недоліком хімічного способу руйнування ГП є екологічна небезпека забруднення середовища.

**Комбіновані способи руйнування ГП.** Гідромеханічний спосіб руйнування - поєднує дію робочого органу та напірного струменю промивної рідини. Технічна база для втілення гідромеханічного способу розвинута провідними світовими виробниками: «Флоу Індастріз», «Кеннаметал» (США), «Андерсон Стратклайд», «Доско» (Великобританія), «Тайсей» (Японія), «Вірт» (Германія).

Перевагами гідромеханічного способу руйнування є [6]:

- розширення області застосування механізмів, на яких встановлені гідромеханічні робочі органи для руйнування ГП з межею міцності на стиснення  $\sigma_{ст}$  (160.0...235.0) МПа;
- зниження зусиль різання на (40...60) % і подачі на (60...70) %;
- зменшення крутного моменту приводу і споживаної потужності на робочому органі в (1.3...2.2) рази;
- підвищення швидкості проходки в (1.5...5.0) разів без збільшення потужності двигуна виконавчого органу;
- зменшення витрат механічного інструменту в (2...6) разів;
- збільшення продуктивності в (1.7...2.2) рази при роботі з міцними ГП (більше 6 за шкалою Протодьяконова) зі збереженням маси і габаритів бурової установки;
- зменшення пилоутворення на (70...85) % та іскроутворення на (90...100) % ;

Недоліки комбінованого гідромеханічного способу руйнування [6]:

- використання струменю води з тиском до 400.0 МПа та витратою (3...6)  $\text{дм}^3/\text{хв.}$  на один різець. Базова машина повинна бути оснащена джерелом води високого тиску (не нижче 100.0 МПа) і витратою (5...10)  $\text{м}^3/\text{год.}$  Потужність такого насоса дорівнює потужності привода виконавчого органа, а часто і перевищує її;

- зниження стійкості насадки зі збільшенням початкового тиску. При тиску в (70.0...80.0) МПа твердосплавна насадка служить до 200 год, а при тиску в 350.0 МПа - всього (3...4) год;

- труднощі каналізації води та підведення її до робочого органу та різців;

- відсутність серійного випуску рукавів та арматури на робочий тиск понад 200.0 МПа;

- залежність стійкості обертових ущільнень (гідрознімачів) від тиску води. Наприклад, при тиску 70.0 МПа досягнута стійкість на протязі 400 год, а при тиску 350.0 МПа - 2 год.

Застосовують також такі комбіновані фізичні способи руйнування: плазмо-вогневий, електроімпульсний, електротермічний.

**Хімічно - механічний спосіб** руйнування ГП оснований на використанні хімічно активних речовин. Такими речовинами є лужні метали, які вступають у реакцію з водою, що присутня в масиві у вільній або кристалогідратній формі. Хімічна дія застосовується для підвищення ефекту руйнування механічними джерелами руйнування.

У результаті досліджень комбінації різних способів руйнування, їх систематизовано орієнтовними графами з десятима вершинами: механічний ударний, механічний обертовий, гідравлічний безперервний, гідравлічний імпульсний, електричний, термічний, ультразвуковий, надвисокочастотний, хімічний та вибуховий (рис. 1.1). Для систематизації використано методику [9].

Граф з не строго паралельними дугами (ГЗНПД – рис. 1а) відповідає комбінованим способам, для яких не важлива послідовність прикладення навантаження. У графі зі строго паралельними дугами (ГЗСПД – рис. 1.1 б)

важлива послідовність прикладення навантаження. З ГЗНПД отримано комбінацій: 72 парних (представлені відрізками) та 576 потрійних способів навантаження (представлені трикутниками). З ГЗСПД отримано комбінацій: 144 парних (півдуга між двома вершинами) та 5184 потрійних навантажень (три півдуги з'єднаних трьома вершинами).

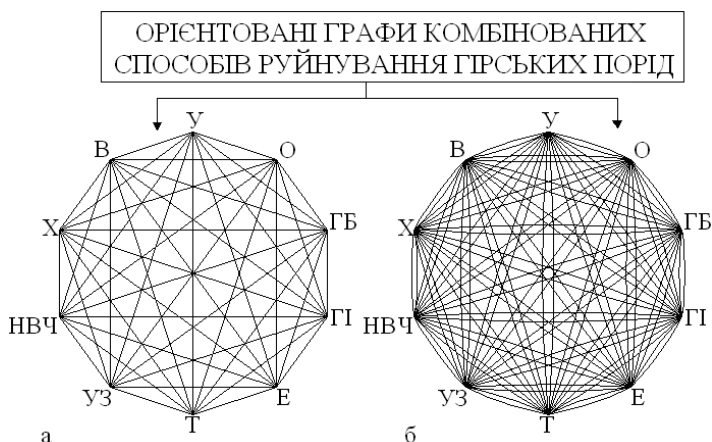


Рисунок 1.1 - Орієнтовні графи комбінованих способів руйнування гірських порід за видом навантаження на гірську породу (У – ударні, О – обертові, ГБ – гідравлічні безперервні, ГІ – гідравлічні імпульсні, Е – електричні, Т – термічні, УЗ – ультразвукові, НВЧ – надвисокочастотні, Х – хімічні, В – вибухові)

Аналіз енергоємностей найбільш поширених комбінованих способів руйнування ГП наведений у табл. 1.1 [2], а одиночних - у таблиці 1.2. [3]

Таблиця 1.1 - Порівняльний аналіз значень енергоємностей комбінованих способів руйнування гірських порід

Комбінований спосіб навантаження	Середня енергоємність руйнування, МДж/м <sup>3</sup>
1	2
Ударно-обертовий	500

Закінчення таблиці 1.1

1	2
Гідроімпульсний	100
Електрогідравлічний	450
Електроімпульсний	150
Електротермомеханічний	650
Термомеханічний	1400

Таблиця 1.2 - Порівняльний аналіз значень енергоємностей одиночних способів руйнування гірських порід [3]

Спосіб руйнування	Питома енергоємність руйнування, МДж/м <sup>3</sup>
1	2
Ударний	200–630
Обертовий	600–950
Ударно - обертовий	400–600
Обертово - ударний	600–800
Вибуховий	200–400
Гідравлічний	1000-2000
Гідроімпульсний	70-100
Електрогідравлічний	400-500
Електротермічний	5000
Електроімпульсний	100-200
Вогневий	1500
Плазмовий	5000
Термошаршковий (термомеханічний)	1200–1600
Електротермомеханічний	500–800

З аналізу даних таблиць 1.1 та 1.2 видно, що енергоємність руйнування ГП знижується за рахунок застосування комбінованого навантаження: для ударного та обертового способів біля 33 %, для гідравлічного – від 70 до 93 %, для електротермічного від 72 до 97 %.

Зниження енергоємності руйнування виникає:

- в ударно-обертовому способі через те, що окрім стиснення ГП має місце її зсув. Тобто, крім осьових деформацій на ГП діють ще й обертові;
- у гідроімпульсному, електрогідравлічному та електроімпульсному способах за рахунок появи деформаційних хвиль у ГП. Через їх імпульсний

характер наступна хвиля наздоганяє попередню і виникає субрезонансний режим по принципу ефекту Допплера [10]. Це створює частотне навантаження на масив, якого не достатньо для руйнування молекулярних зв'язків, а лише для їх ослаблення.

- у електротермомеханічному та термомеханічному способах внаслідок зростання локальних напружень міжатомних зв'язків. Це пов'язано з кінетичною теорією пружності [11], за якою тепловий рух молекул є одним із основних чинників, що обумовлюють процес руйнування ГП. Фізично це відбувається наступним чином: при термічній дії зростання частоти коливального руху молекул продовжується до тих пір, поки навантаження молекулярних зв'язків не наближається до значення межі міцності на розрив. Після цього виникають магістральні тріщини і ГП руйнується.

Промислове впровадження нового комбінованого ОМГК способу не потребує додаткових витрат енергії і забезпечує зниження питомої енергоємності руйнування ГП. Реалізація відбувається завдяки зміні геометричних параметрів робочого інструменту. Спосіб дозволяє активізувати енергетичний потенціал потоку промивної рідини при кавітації. За рахунок енергії схлопування кавітаційних бульбашок, відбувається створення штучної тріщинуватості та ініціювання поширення природної. У сукупності вони формують зону передруйнування. Важливість створення зони передруйнування при видобутку ГП описана у дослідженнях Г. І. Баренблатта, Д. Броека, А. Гріффітса, А. Ф., Іоффе М. Я. Леонова, В. В. Панасюка та інших.

А. Гріффітс дійшов висновку, що міцність крихких твердих тіл обумовлена міцністю на розрив їх структурних зв'язків. Останні ослаблені за рахунок поверхневих мікротріщин. Це підтверджено експериментальними дослідженнями А. Ф. Іоффе [12], який розчинив верхній шар кам'яної солі, що містив мікротріщини. Після цього виміряв міцність на розрив і отримав значення наближені до теоретичної міцності.

Згідно з дослідженнями Я. М. Фем'яка [13], при суто механічному руйнуванні ГП на утворення тріщин витрачається (8...12) % загальної енергії.

Для завершення формування тріщини з досягненням їх кінцевих глибин – (10...12) %, для сколювання - (6...8) %. Решта - (68...72) % витрачаються на роздавлювання ГП, пружну деформацію, тертя тощо. При ОМГК руйнуванні ГП на утворення нових - технологічних тріщин і розвиток природніх направлена енергія кавітаційного потоку. Це сприяє зниженню загальних енергетичних витрат майже до 24 %.

На сьогодні вже проводились промислові випробування обладнання для реалізації ОМГК способу руйнування ГП. Так, наприклад, при використанні гідродинамічного кавітаційного генератора на Узинському УБР об'єднання «Мангішлакнефть» (Казахстан) на турбобурі ЗТСШ-195 вдалось досягти зменшення часу буріння в середньому на 24 % та збільшити швидкість буріння на 30 % [14].

У США фірмою «Mobile Research and Development» проведено повномасштабні дослідження руйнування ГП за рахунок кавітаційних явищ від звукових коливань. У результаті обґрунтовано кавітаційний спосіб буріння [15].

Також фірмою «Hydranautics and National Lead Nycalog» успішно проведено дослідження по створенню гідродинамічного кавітатора, що обумовлює схлопування кавітаційних бульбашок у декілька етапів з можливістю подовжити час перебігу кавітаційного процесу [16].

Проте, при розміщенні кавітаційного генератора всередині інструменту, вектор руху кавітаційних бульбашок направлений на різучі кромки. Це спричиняє їх руйнування. На основі теореми Лармора зроблено висновок, що під дією постійного магнітного поля кавітаційні каверни фокусуються навколо осі потоку промивної рідини. Це запобігає руйнуванню інструменту від кавітації та створює імпульсне навантаження на масив.

На основі цього запропоновано новий комбінований енергозберігаючий ОМГК спосіб і різець кавітаційний для зниження енергоємності руйнування. Цей спосіб и різець кавітаційний (Патент 101946 UA, МКП E21B 7/18, 12.10.2015) для його реалізації відповідає відрізка О-ГБ на рис. 1.1 а. Цікавим для дослідників є залежність зміни енергоємності процесу руйнування при



МГК навантаженні від магнітної індукції у дифузорі кавітатора. Це дасть змогу обґрунтовано обирати робочий режим руйнування різних ГП при МГК навантаженні.

## 1.2 Кавітаційні процеси як додаткове джерело енергії

Кавітаційні бульбашки утворюються в рідині при розтягуючому напруженні близько 27,5 МПа [17]. Їх об'ємна концентрація знаходиться в межах  $(1 \dots 10^{10}) \text{ 1/м}^3$  [18]. При зхлопуванні кавітаційних бульбашок виникають імпульси тиску, що досягають 10<sup>3</sup> МПа [18]. При таких значеннях концентрації та тисків питома потужність кавітаційного потоку рідини складає  $(10^4 \dots 10^5) \text{ кВт/м}^3$ . Така потужність є додатковим альтернативним джерелом енергії при руйнуванні ГП. За рахунок його використання знижується енергоємність руйнування.

Однією з умов виникнення кавітації є наявність у ній домішок у вигляді найдрібніших твердих часточок, навколо яких утворюються кавітаційні бульбашки [19]. Такими домішками є іони натрію, калію, заліза, хлору тощо. При протіканні води через кавітатор утворюється зона зниженого тиску, у якій виникають гідродинамічні коливання. Це призводить до виникнення передзародкових місцевих скупчень газу або стійких зародків бульбашок навколо іонів розчинених у воді речовин. І, як результат, - кавітації. При потраплянні іонів води у постійне магнітне поле  $\vec{B}$  вони починають прецесувати разом з кавітаційними бульбашками. Частота прецесування визначається з теореми Лармора [20]. Проте прецесійний рух заряджених частинок не може продовжуватись постійно. Наявність гальмуючих сил призводить до того, що енергія прецесуючого магнітного моменту згасає і кут прецесування  $\Psi$  зменшується за експоненціальним законом [21]. При накладенні на іонні домішки змінного магнітного поля  $\vec{B}$  кругової поляризації, перпендикулярного постійному  $\vec{B}$ , втрати енергії відновлюються за рахунок  $\vec{B}$ . При цьому кут  $\Psi$  змінюється за резонансним характером при співпадінні

частот поля  $\bar{B}$  та прецесування  $\Omega$  (1.1) [20]. Це явище феромагнітного резонансу ларморової прецесії передбачено ще у 1935 році фізиками Л. Д. Ландау та Є. М. Лівшицем. Експериментально підтверджено А. А. Гріффітсом в 1946 році.

Частота прецесії кавітаційного потоку  $\Omega$ , Гц [20]:

$$\Omega = \varsigma \cdot B, \quad (1.1)$$

де  $\varsigma$  – гіромагнітне відношення, А·с/кг;

$B$  – індукція магнітного поля, Тл.

Гіромагнітне відношення являє собою відношення магнітного до механічного моменту частки [20, 22], А·с/кг:

$$\varsigma = g \cdot \frac{e}{2 \cdot m} = g \cdot \frac{\mu_b}{\hbar}, \quad (1.2)$$

де  $g$  – чинник, в.о.;

$e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  – заряд електрона, Кл [20];

$m = 9.1 \cdot 10^{-31}$  – маса електрона, кг [20];

$\mu_b = 927.4 \cdot 10^{-26}$  – магнетон Бора, Дж/Тл [20];

$\hbar = 6.626 \cdot 10^{-34}$  – постійна Планка, Дж·с [20].

За умови виходу пікової точки кавітаційної зони за межі різця, створюється зона передруйнування. При цьому кавітаційний потік передає імпульсне навантаження з субрезонансними частотами масиву ГП. Починається зростання природної та утворення штучної тріщинуватості. Мікротріщини «зливаються» у магістральну. Напрямок магістральної тріщини визначається вектором кавітаційного потоку, який є джерелом енергії для її зростання і сприяє постійному руху. Положення пікової точки та форма кавітаційної каверни залежить від геометричних параметрів дифузору, положення магнітів у

корпусі різця та значення їх індукції. Отже, додатковою функцією магнітного поля при руйнуванні ГП є забезпечення виходу пікової точки сфокусованого кавітаційного потоку за межі зубів різця.

### 1.3 Критерії руйнування гірських порід

Математичні моделі для вирішення різноманітних задач теорії руйнування представлені у роботах А. Гріффітса, С. Н. Журкова, Г. Ірвіна, Ш. Кулона, Т. Мора, В. Новацького, Е. Орована, В. В. Панасюка, Л. Прантдаля, Д. Райса, А. Сен-Венана, А. Е. Треска, А. А. Фрідмана, Є. І. Шемякіна, А. Шлейхера [1, 3, 4, 22 - 30] та інших. Запропоновані цими вченими моделі побудовані на методах механіки суцільних середовищ дозволяють урахувати енергетичні та міцнісні параметри руйнування. Проте, оминають аспекти молекулярної будови ГП та зміну їх характеристик при зміні властивостей середовища. У результаті, знижується адекватність опису поведінки масивів ГП при руйнуванні. У докритичному стані, при нерівномірному розподілі навантажень, в зернистих ГП розвивається мікротріщинуватість. Це пов'язано з наявністю площин дислокацій. Тому, удосконалення згаданих вище моделей необхідно проводити на основі механіки дискретних середовищ, з урахуванням новітніх досягнень теорії крихкого руйнування та теорії дислокацій.

Дослідження механіки руйнування твердих тіл розпочато у роботах А. Гріффітса (початок ХХ ст.). У його роботі [22] вперше процес руйнування пов'язаний не з константами матеріалу, а з довжиною тріщин. А. Гріффітс проводив дослідження для пластини одиничної товщини. Висунув гіпотезу, що тріщина у твердому тілі розвивається під навантаженням за умови, що швидкість вивільнення потенційної енергії деформації більша за приріст ППЕ тіла:

$$\left| \frac{\partial W}{\partial l} \right| \geq \frac{\partial U}{\partial l}, \quad (1.3)$$

де  $W$  – потенційна енергія деформації пластини, Дж;

$l$  – половина довжина тріщини, м;

$U$  – поверхнева енергія тріщини (для пластини одиничної товщини), Дж/м.

Критична довжина тріщини (критерій руйнування А. Гріффітса)  $K_{Gr}$ , м [31, 32]:

$$2 \cdot l \geq K_{Gr} = 2 \cdot \gamma \cdot E / \sigma^2, \quad (1.4)$$

де  $\gamma$  – питома поверхнева енергія, Дж/м<sup>2</sup>;

$E$  – модуль пружності I роду, Па;

$\sigma$  – напруження розтягу, Па.

З аналізу (1.1) витікає, що основними параметрами, які впливають на процес руйнування твердого тіла є міцнісні характеристики та ППЕ. Під час руйнування потенційна енергія деформації пластин  $W$  перетворюється в ППЕ новоутворених частин твердого тіла. Проте, бажано провести додаткові дослідження по узгодженню розмірностей лівої та правої частини. За думкою [33] у критерії А. Гріффітса не враховано вплив пластичної деформації на процес утворення тріщини. Тому, під час розрахунку руйнуючих напружень за критерієм А. Гріффітса значення результатів перебільшені.

Критерій Е. Орована, м [31, 32]:

$$2 \cdot l \geq K_{GrO} = 2 \cdot \gamma_{ef} \cdot E / \sigma^2, \quad (1.5)$$

де  $\gamma_{ef}$  – ефективна питома поверхнева енергія, яка складається з суми питомої поверхневої енергії  $\gamma$  та питомої роботи пластичних деформацій  $\gamma_{пл}$ .

Критерій Е. Орована відрізняється від критерію А. Гріффітса наявністю ефективної ППЕ, що дозволяє урахувати пластичні деформації. Це наближає математичну модель (1.5) до реального процесу. Точність розрахунку

підвищується. Але є ті ж самі недоліки, що і в (1.4): розмірності лівої і правої частини слід узгодити.

У роботі [23] Г. Ірвіном запропонований універсальний критерій руйнування,  $D_j/(m^2 \cdot \sqrt{m})$ :

$$K_{Ip} = \sqrt{E \cdot \gamma / (1 - \mu^2)}, \quad (1.6)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона, в.о.

У (1.6) на відміну від попередньо вказаних критеріїв додатково враховано відношення пластичних до повздовжніх деформацій, пов'язані коефіцієнт інтенсивності напружень та ППЕ. Проте, розмірність критерію має не скомпенсований метр під коренем. Це вказує на недостатність або надлишок параметрів у правій частині рівняння і потребує додаткових досліджень.

Як видно з аналізу критеріїв руйнування А. Гріффітса, Г. Ірвіна та Е. Орована, ППЕ є одним з ключових параметрів, від якого залежить процес руйнування.

Ірвін сформулював силовий критерій руйнування суть якого полягає в тому, що тріщина отримує можливість руйнування, коли коефіцієнт інтенсивності напружень  $K$  досягає критичної величини  $K_0 = \text{const}$ ,  $\text{Па} \cdot \text{м}^2$  [24]:

$$K = K_0. \quad (1.7)$$

Формула (1.7) відповідає ідеальному пружному руйнуванню. Для урахування довжини пластичної зони вводять пластичну поправку Г. Ірвіна в основі якої лежить ідея збільшення довжини тріщини на половину довжини пластичної зони. Відповідно, радіус пластичної зони  $r$ , м [24]:

$$r = \left( 2 \cdot \pi \cdot \sigma^2 / K^2 \right), \quad (1.8)$$

де  $\sigma_T$  - межа текучості, Па.

Перевагами теорії руйнування Г. Ірвіна (та Е. Орована, так як вони незалежно один від одного прийшли до однакових результатів досліджень) є те, що:

- виконано перехід від ідеального середовища в моделі А. Гріффітса до реальних середовищ, що руйнуються;
- ураховано, що зона нелінійних дефектів мала в порівнянні з довжиною тріщини через теорію квазікрихкого руйнування;
- визначено радіус пластичної зони навколо верхівки тріщини.

Недоліками є те, що не враховано геометричні розміри масиву та тріщини, можливість їх взаємодії під час руйнуванні. Також розмірності лівої та правої частини (1.8) не співпадають. Радіус пластичної зони виведено з похибкою.

Концентраційний критерій руйнування або критерій укрупнення тріщин  $K_{ж}$  вперше представлений у роботі С. Н. Журкова зі співавторами [25]:

$$K_{ж} = \frac{t}{L} = \frac{c}{L} \sqrt{\frac{-1}{3}}, \quad (1.9)$$

де  $t$  – відстань між тріщинами, м;

$L$  – довжина тріщини, м;

$c$  – концентрація тріщин, в.о.

У цій роботі автор представив ідею термофлуктуаційного характеру процесу руйнування. Перевагою (1.9) є те, що ураховано відстань між тріщинами та можливість їх взаємодії (злиття) при виникненні напружень. Недоліком є те, що не враховано міцнісні характеристики твердого тіла. Тобто, якщо гіпотетично уявити існування двох тіл з різними механічними характеристиками, але з однаковими (або подібними) розмірами та розміщенням тріщин, то згідно з (1.9) руйнування наступить під час

прикладення однакових навантажень. На практиці, потрібні різні навантаження для руйнування таких тіл, що обумовлено фізичними властивостями та механічними характеристиками ГП. Також повторена помилка досліджень А. Гріффітса (1.3) та Г. Ірвіна (1.8), - розмірності лівої та правої частини потребують уточнення. Фізика процесу руйнування не зовсім точно відображає реальний процес.

Для областей з неоднорідним коефіцієнтом тріщинуватості більш доцільно використовувати для визначення умов руйнування критерій Кулона-Мора [34]:

$$\left| \sigma_{\tau} \right| = C_f \cdot \left| \sigma_n \right|, \quad (1.10)$$

де  $\sigma_{\tau}$  – нормальне напруження, Па;

$C_f$  – коефіцієнт тертя, в.о.;

$\sigma_n$  – дотичне напруження, Па.

Критерій Кулона-Мора визначає умови руйнування через тензор напружень. Це дозволяє урахувати нелінійний характер деформування при збільшенні навантажень, а також кут внутрішнього тертя. Недоліком є те, що згідно представленого критерію, модуль деформації на стадіях навантаження і розвантаження однаковий.

З аналізу представлених вище критеріїв руйнування, зроблено висновок, що ППЕ є одним з ключових параметрів, від якого залежить перебіг процесу руйнування ГП та утворення тріщин. Проте, ППЕ розглядається як незмінна величина. Не досліджено питання зміни ППЕ при зміні параметрів середовища руйнування. Тому, цікаво отримати і проаналізувати залежності зміни ППЕ ГП від магнітної індукції та геометрії дифузора кавітатора під час МГК навантаженні. А також встановити закономірності зміни енергоємності руйнування від ППЕ ГП.

## 1.4 Математичні моделі питомої поверхневої енергії

За дослідженнями [22, 35] мірою опору матеріалу руйнуванню є коефіцієнт поверхневого натягу. Він застосовується до рідин. У механіці руйнування твердого тіла цей коефіцієнт має іншу фізичну інтерпретацію. Це величина, яка є відношенням енергії  $W$  на межі матеріалу до одиниці поверхні  $S$  при постійній температурі та є ППЕ, Дж/м<sup>2</sup>:

$$\gamma = \frac{W}{S}. \quad (1.11)$$

У кількісному вигляді  $\gamma$  є роботою, що необхідна для створення одиниці нової поверхні матеріалу, що по суті є виникненням тріщин. Їх утворення і зростання супроводжується формуванням двох берегів. Внаслідок чого на утворення одиниці площі потрібно енергії  $2\gamma$ . Ця ідея виражена у формулі довжини критичної тріщини, м [26]:

$$l_k = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T^2}, \quad (1.12)$$

де  $E$  – модуль пружності І роду, МПа;

$\sigma_T$  – теоретична межа міцності, МПа.

Тріщина зростає після досягнення теоретичної межі міцності  $\sigma$ . Зростання тріщини відбувається з утворенням нових поверхонь. Їх ППЕ дорівнює роботі міжатомних сил в об'ємі  $a^3$  ( $a$  – параметр кристалічної решітки, м), віднесений до площі  $a^2$ , Дж/м<sup>2</sup> [25, 35]:

$$\gamma = \frac{\sigma^2 \cdot a}{2 \cdot E}. \quad (1.13)$$



З аналізу (1.11 - 1.13) зроблено висновок, що ППЕ є ключовим чинником у процесі руйнування ГП і пов'язана з розривом міжмолекулярних зв'язків. Це також підтверджено дослідженнями Є. М. Морозова, Дж/м<sup>2</sup> [27]:

$$\gamma = \frac{a \cdot \sigma}{2}. \quad (1.14)$$

У математичній моделі ППЕ [36] враховано молекулярні параметри матеріалу, Дж/м<sup>2</sup>:

$$\gamma = \left( \Delta H \cdot N_{\kappa}^{2/3} \right) / 4, \quad (1.15)$$

де  $\Delta H$  – питома енергія сублімації матеріалу, Дж/м<sup>2</sup>;

$N_{\kappa}$  – кількість елементарних частинок у конденсованій системі, шт.

У (1.15) ППЕ представлено через енергетичні показники процесу сублімації. Недоліком є те, що не враховано механічні властивості ГП.

Згідно [37, 38] ППЕ дорівнює потенціалу взаємодії між двома, розділеними навпіл площиною Міллера, частинами кристалу на одиницю площі, Дж/м<sup>2</sup>:

$$\gamma = \sum_{\kappa=1}^{\infty} \frac{\kappa \cdot \mathcal{E}_{\kappa}}{S}, \quad (1.16)$$

де  $\kappa$  – номер атомарного шару, в.о.;

$\mathcal{E}_{\kappa}$  – енергія взаємодії атома з усіма атомами шару, у якому він знаходиться, Дж;

$S$  – площа поверхні одного атому з урахуванням зони дії атомарних зв'язків, м<sup>2</sup>.

Перевагою (1.16) є те що ППЕ розглянута з точки зору міжатомної взаємодії та враховує енергетичний параметр кристалічних зв'язків  $\mathcal{E}_k$ . Недоліком (1.15) та (1.16) є те, що не враховано фізичні властивості матеріалу.

Математична модель визначення ППЕ на молекулярному рівні для площин Міллера з індексами 100, 110 та 111 представлена у роботі І. М. Странського та Р. Каїшева [39], Дж/м<sup>2</sup>:

$$\gamma(100) = \varphi \left( 2 \cdot r_0^2 \right); \quad (1.17)$$

$$\gamma(110) = \varphi \left( \sqrt{2} \cdot r_0^2 \right); \quad (1.18)$$

$$\gamma(111) = \sqrt{3} \cdot \varphi \left( 2 \cdot r_0^2 \right), \quad (1.19)$$

де  $\varphi$  – робота розриву зв'язків сусідніх елементарних частинок, Дж;

$r_0$  - відстань між сусідніми елементарними частинками, м.

Перевагою (1.17 – 1.19) є те, що враховано енергетичні показники процесу руйнування міжмолекулярних зв'язків. Недоліком є те, що ця математична модель адекватна тільки для квадратної форми кристалічної решітки, яка визначається за правилом Гібса – Вульфа [39]. А також не враховано фізичні властивості матеріалу.

А. Гріффітс [36] запропонував свою модель ППЕ твердого тіла  $\delta_\gamma$ . На основі закону збереження енергії, під час збільшенні тріщини на площу  $\delta S$ , виконується енергетична умова вигляду, Н/м<sup>2</sup>:

$$\delta_\gamma = G \cdot \delta \cdot S, \quad (1.20)$$

де  $G$  – приток енергії в вершину тріщини, що припадає на одиницю площі тріщини або інтенсивність енергії, що вивільнюється, Дж/м<sup>2</sup>.

У (1.20) приток енергії в вершину тріщини прийнятий з урахуванням площі утворення нової поверхні. Для узгодження фізики процесу лівої та правої частини (1.18), бажано уточнити доцільність урахування  $\delta S$ .

ППЕ тріщини для пластини одиначної товщини з досліджень А. Гріффітса, Дж/м [36]:

$$U = 4 \cdot l \cdot \gamma, \quad (1.21)$$

де  $\gamma$  – ППЕ руйнування, Дж/м<sup>2</sup>.

Теорія А. Гріффітса підходить тільки для крихких матеріалів. У реальному тілі у вершині тріщини виникає пластична деформація. Наявність пластичної зони навколо вершин тріщини призводить до її зростання. Наприклад, для полімерів встановлено, що величина ППЕ  $\gamma$  знаходиться в інтервалі (100...1000) Дж/м<sup>2</sup>, а не декілька Дж/м<sup>2</sup>, як передбачалось [34].

Перевагою моделі А. Гріффітса є відображення зменшення реальної міцності матеріалу відносно теоретичної. Крім того, враховано, що максимальне руйнуюче навантаження досягається після досягнення тріщиною критичних розмірів (індивідуальних для кожного окремого випадку).

Недоліками є те, що не враховані: можливість матеріалу опиратися росту тріщини; геометричні розміри масиву (довжина, ширина) в якому розглядалася тріщина, а також геометричні розміри самої тріщини (форма, великий, та малий радіуси).

На основі досліджень А. Гріффітса, незалежно один від одного, вчені Г. Ірвін та Е. Орован визначили, що поблизу поверхні тріщини виникає зона концентрації пластичних деформацій, тобто, виникає квазікрихке руйнування [24]. Фізика квазікрихкого руйнування полягає в тому, що лінійні розміри зони деформації біля тріщини малі відносно її довжини. Тому потік пружної енергії розраховується з урахуванням лише пружних характеристик. При цьому витрата енергії на руйнування обумовлена роботою пластичних деформацій.

Г. Ірвін дослідив, що енергетичний підхід А. Гріффітса адекватний тільки для квазікрихкого руйнування. Г. Ірвін представив питому енергію руйнування  $\gamma_p$  у вигляді суми ППЕ  $\gamma$  та питомої роботи пластичних деформацій  $\gamma_n$  [28].

Недоліком усіх представлених вище моделей є те, що у них не враховано вплив технологічних та фізико-механічних параметрів процесу руйнування. ППЕ представлена, як незмінна величина, у деяких порушена фізика процесу. Виникає задача виправити перелічені недоліки та дослідити залежності зміни ППЕ від технологічних параметрів руйнування.

ППЕ за теоретичними дослідженнями Дж. Гілмана [40], що експериментально підтверджені І. Обреїмовим, Дж/м<sup>2</sup> [29]:

$$\gamma = E \cdot \alpha_0^2 / (Y_0 \cdot \pi^2), \quad (1.22)$$

де  $\alpha_0$  - радіус дії міжмолекулярних сил притягання, м;

$Y_0$  - відстань між сусідніми площинами розщеплення, м.

Перевагою (1.22) є те, що в ній враховано міцнісні характеристики ГП через модуль пружності першого роду  $E$ , енергетичні параметри взаємодії елементарних частинок через радіус дії міжмолекулярних сил притягання  $\alpha_0$  та параметр кристалічної решітки через відстань між сусідніми площинами розщеплення  $Y_0$ . Відрізняється (1.22) від розглянутих, тим що у ній поєднано молекулярні та міцнісні параметри. Тому у якості базової моделі для дослідження ППЕ ГП під дією МГК навантаження обрано (1.22).

## Висновки

1. На основі теорії графів запропоновано два десятивершинні орієнтовані графи способів руйнування гірських порід: зі строго паралельними дугами та з не строго паралельними дугами. З першого отримано 72 парних та 576 потрібних комбінованих способів навантаження. З другого отримано 144 парних та 5184 потрібних комбінованих способів навантаження.

2. Запропоновано новий комбінований енергозберігаючий обертовий магніто-гідродинамічний кавітаційний спосіб руйнування гірських порід для зниження енергоємності їх руйнування за рахунок вивільнення внутрішньої потенційної енергії масиву.

3. Аналіз критеріїв руйнування Г. Ірвіна, Е. Орована, А. Гріффітса, С. Н. Журкова та інших показав, що питома поверхнева енергія є одним з ключових чинників руйнування гірських порід та розглядається як незмінна величина. Для розгляду питомої поверхневої енергії, як змінної величини потрібна уточнена математична модель з урахуванням технологічних та механічних параметрів руйнування.

## РОЗДІЛ 2 КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Планування аналітичних та експериментальних досліджень

Для проведення досліджень по визначенню зміни ППЕ під дією МГК навантаження, обрано незалежні змінні параметри: довжину дифузора та магнітну індукцію у дифузорі кавітатора різця кавітаційного. Вибір цих параметрів обумовлений тим, що від них залежить виникнення і характер перебігу кавітаційного процесу. МГК навантаження обумовлює утворення тріщинуватості ГП, зміну ППЕ та, як результат, зниження енергоємності руйнування. Обрані параметри відповідають вимогам [42]: змінюються за побажанням дослідника; визначаються з похибкою не більшою, ніж 5 %; вимірювані; встановлення деякого рівня одного не залежить від прийнятих значень іншого; комбінація на будь-яких рівнях здійсненна.

Для проведення аналітичних досліджень створені і представлені у розділі 3 математичні моделі:

- енергоємності руйнування ГП, в залежності від ППЕ (3.14);
- ППЕ, що залежить від технологічних параметрів руйнування під дією МГК навантаження (3.21).

Завданням експериментального дослідження є підтвердження або спростування правильності вищеперелічених моделей.

Енергоємність руйнування ГП ОМГК способом з використанням різця кавітаційного є одним з основних інтегральних параметрів оптимізації об'єкту дослідження. Енергоємність руйнування, як параметр оптимізації, відповідає наступним вимогам [42]: характеризує процес руйнування ГП; відноситься до енергетичних параметрів; має кількісний характер; визначається для різних видів ГП, тобто є універсальним показником.

Критерієм оптимізації є енергоємність руйнування ГП ОМГК способом. Задачею оптимізації є знаходження мінімальної енергоємності руйнування при заданих довжині дифузора та магнітної індукції у дифузоре кавітатора різця кавітаційного.

Для аналітичного дослідження залежності енергоємності руйнування ГП від ППЕ обрано метод математичного моделювання. Дослідження проводиться на основі математичної моделі зміни ППЕ та енергоємності від обраних незалежних змінних параметрів. На енергоємність руйнування впливають також:

- відстань між атомами структури породного масиву;
- тип кристалічної решітки;
- межа міцності на розрив міжмолекулярного зв'язку;
- коефіцієнт тертя інструменту об гірську породу;
- теоретична межа міцності;
- модуль пружності I роду;
- коефіцієнт Пуассона.

Але ці параметри не було прийнято як зміни стану, оскільки не виконуються умови керованості і незалежності.

Для визначення залежності енергоємності руйнування ГП від обраних змінних параметрів (довжина дифузора та магнітна індукція у дифузоре кавітатора різця кавітаційного) прийнято повночинниковий експеримент вигляду  $2^k$  ( $k$  – кількість незалежних змінних параметрів). Досліджувані змінні варіюються на трьох рівнях: максимальному (+), мінімальному (-) і нульовому (0), відносно якого два перші рівні розташовані симетрично [43]. При такій кількості рівнів, для дослідження енергоємності руйнування, обрано ненасичений центральний композиційний план (план Хартлі) типу  $B_n$  [44, 45]. Тобто, чинники приймають значення, симетричні відносно центру плану - умовної нульової лінії. Ненасиченість плану обумовлена тим, що кількість незалежних змінних параметрів менша кількості дослідів. Тип  $B_n$  є симетричним планом другого порядку з ядром у вигляді повночинникового

експерименту  $2^k$ . Результати дослідів в нульовій точці застосовуються для перевірки гіпотези про адекватність моделі експериментальним даним [48]. При такому типі плану обрано поліноміальний клас регресійної моделі [42, 43] (2.1-2.3). Якщо обрана модель не відповідатиме перевірці на адекватність, то степінь полінома буде збільшено.

Цільова функція оптимізації для дослідження енергоємності руйнування ГП в залежності від довжини дифузору та магнітної індукції у дифузори кавітатора різця кавітаційного, перетворена згідно загальної теорії [42, 43, 46, 47] має вигляд:

$$E_p = b_0 + b_1 \cdot B + b_2 \cdot l + b_{12} \cdot B \cdot l + b_{11} \cdot B^2 + b_{22} \cdot l^2; \quad (2.1)$$

$$B_{\min} \leq B \leq B_{\max} \quad (B \geq 0); \quad (2.2)$$

$$l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \quad (l \geq 0), \quad (2.3)$$

де  $E_p$  – енергоємність руйнування гірської породи, Дж/м<sup>3</sup>;

$b_j$  – коефіцієнти рівняння регресії, в.о.;

$B_{\min}, B_{\max}$  - граничні обмеження магнітної індукції у дифузори кавітатора різця кавітаційного, мТл;

$l_{\min}, l_{\max}$  – граничні обмеження довжини дифузору кавітатора різця кавітаційного, м.

Загальна кількість дослідів для ненасиченого центрального композиційного плану типу  $B_n$  складає, шт. [45]:

$$N = N_0 + 2k + 1, \quad (2.4)$$

де  $N_0=2^k$  – кількість точок ядра плану, шт.;

$k$  – кількість незалежних змінних параметрів, шт.

При  $k=2$ , кількість дослідів  $N=2^2+2 \cdot 2+1=9$ . Обраний тип плану передбачає мінімальну кількість рівнів варіювання змінних параметрів рівну трьом. Це



дозволяє більш точно витримувати режими роботи при проведенні дослідів у порівнянні з планами, які потребують зростання числа рівнів варіювання незалежних змінних параметрів. На кожному рівні варіювання проводиться рівна кількість дослідів [44, 45, 48].

Для побудови плану експерименту необхідно обрати критерії оптимальності. Вони поділяються на дві групи: критерії пов'язані з помилками коефіцієнтів рівняння регресії та критерії пов'язані з помилками поверхні відгуку. Перший група критеріїв характеризує еліпсоїд розсіювання коефіцієнтів, математичним сподіванням і дисперсією значень помилок. Просторове розташування, форма, і розмір еліпсоїда повністю залежать від плану експерименту. До першого типу відносяться критерії: А, D, Е тощо [49]. Критерії другої групи використовуються при вирішенні задач опису поверхні відгуку, визначення обмежень та значення параметрів.

Обраний для дослідження ненасичений центральний композиційний план типу  $B_n$  наближений до D- та G- оптимальних планів. Критерій G-оптимальності дозволяє побудувати план з мінімальним значенням найбільшої помилки в описі функції відгуку [49]. Критерій D-оптимальності - відповідає мініимальному обсягу еліпсоїда розсіювання помилок. У даному плані чинники максимально незалежні один від одного. Цей план мінімізує очікувану помилку передбачення функції відгуку.

Матриця планування експериментального дослідження енергоємності руйнування ГП в умовних змінних (де  $N_z = \sum_{i=1}^N x_i^2$  [50]) приведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Матриця планування експерименту у неявному вигляді

№ дослідів	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	y
1	2	3	4	5	6	7	8
1	+	-	-	+	+	+	$y_1$
2	+	-	0	0	+	0	$y_2$
3	+	-	+	-	+	+	$y_3$

Закінчення таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8
4	+	0	-	0	0	+	$y_4$
5	+	0	0	0	0	0	$y_5$
6	+	0	+	0	0	+	$y_6$
7	+	+	-	-	+	+	$y_7$
8	+	+	0	0	+	0	$y_8$
9	+	+	+	+	+	0	$y_9$
$N_z$	9	6	6	4	4		-

Для усіх елементів матриці планування виконується умова парної ортогональності стовпців [49]. Чинник  $x_0$  – фіктивна змінна, що допомагає спростити розрахунки коефіцієнтів рівняння регресії.

## 2.2 Стенд для досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід

Для проведення експериментальних досліджень зміни ППЕ ГП під дією МГК навантаження створено стенд, схему якого представлено на рис. 2.1. Експериментальний стенд призначено для вивчення зміни ППЕ при зміні параметрів, що визначають режим МГК навантаження: довжини дифузору та магнітної індукції у дифузоре кавітатора різця кавітаційного. Функціями системи є збільшення штучної та ініціювання зростання природної тріщинуватості вибою, зниження ППЕ для зменшення енергоємності руйнування ГП.

Схема працює наступним чином. Промивна рідина відкачується за допомогою відцентрового самовсмоктуючого насосу JEX 500 (позиція 2) з резервуару 8. Потужність насосу - 500 Вт, частота обертання двигуна насосу –  $48.3 \text{ c}^{-1}$  (2900 об/хв.), продуктивність  $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  (80 л/хв.), максимальна висота всмоктування – 8 м. Максимальна температура рідини, що перекачується 313 К (+ 40 °C) [46]. Вибір типу насосу обумовлений тим, що він є самовсмоктуючим,

та не потребує додаткових елементів приводу. Це зменшує габарити установки та кількість елементів схеми і тим самим підвищує її надійність.

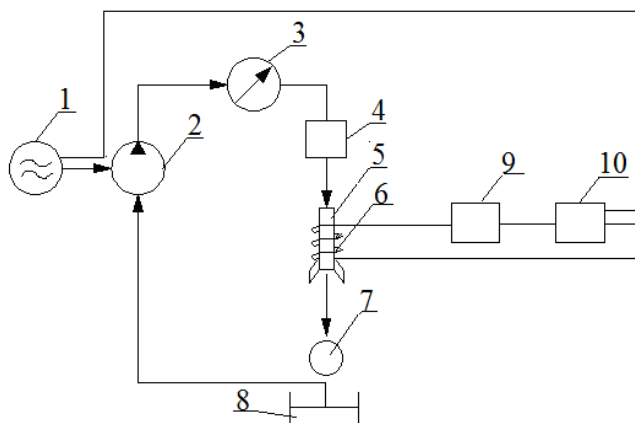


Рисунок 2.1 - Схема експериментального стану для досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід під дією магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження: 1 – електрична мережа змінного струму 220 В; 2 – відцентровий насос JEX 500; 3 – манометр ДМ 05063; 4 – муфта; 5 – кавітатор; 6 – обмотка індуктивності постійного струму; 7 – зразок гірської породи; 8 – резервуар; 9 – випрямляч ВСА-5К; 10- блок резисторів ПЗВ-100

Тиск у системі подачі води вимірювався за допомогою манометра ДМ 05063 (позиція 3). Робочий діапазон реєстрації значень від 0 до 1 МПа при температурі від 233 до 423 К (- 40 до + 150 °С). Клас точності – 2.5 [47].

За допомогою муфти 4 на виході трубопроводу кріпиться кавітатор 5. Останній є вузлом різця кавітаційного, що забезпечує МГК навантаження ГП. Обмотка індуктивності постійного струму 6, розміщена на кавітаторі, слугує для створення постійного магнітного поля та забезпечує фокусування кавітаційних каверн. На виході кавітатора для МГК обробки розміщується зразок ГП 7. Обмотка 6 живиться від електричної мережі 220 В і під'єднана через випрямляч ВСА-5К (позиція 9) [51] Працює у режимі плавного

регулювання випрямленого струму та напруги в межах (0...12) А та (0...65) В, відповідно. Умови експлуатації: температура оточуючого середовища (233...313) К; відносна вологість повітря до 80 %. Котушка індуктивності в умовах роботи постійного струму не створює реактивного опору. Тому, для уникнення короткого замикання у ланцюзі 1-10-9-6 (рис. 2.1) та для забезпечення безперебійної роботи випрямляча використано блок резисторів ПЭВ-100 (позиція 10), з'єднаних паралельно. Струм і напруга у обмотці постійного струму кавітатора визначались за допомогою амперметра і вольтметра випрямляча ВСА-5К. Магнітна індукція вимірювалась магнітометром НТ20 [52], рис 2.2.



Рисунок 2.2 – Магнітометр НТ20

Діапазон вимірювання значень магнітної індукції (0...2000) мТл. Точність вимірювань (0.1...1) мТл, похибка  $\pm 2$  %. Температура оточуючого середовища пристрою (278...313) К, відносна вологість (20...80) %.

Для проведення експерименту визначені наступні умови:

- потрібно використовувати закрите приміщення;
- лабораторний стенд повинен бути розміщений у приміщенні захищеному від сторонніх вібрацій, у тому числі побутових. Допустимі межі (0.25...55) Гц;

- температура оточуючого середовища, у тому числі промивної рідини, повинна знаходитись в межах (288...298) К;

- відносна вологість приміщення (10...80) % без конденсації;

- атмосферний тиск (630...800) мм рт. ст

Зображення різця кавітаційного, запропонованого до промислового виробництва, представлено на рис. 2.3.

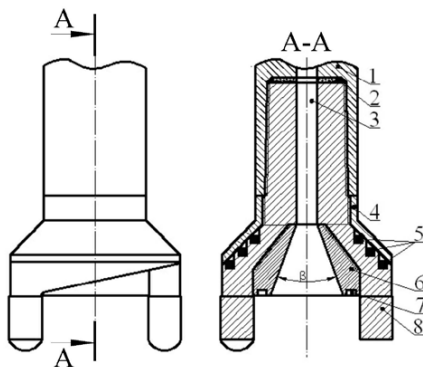


Рисунок 2.3 - Різець кавітаційний з фрагментом бурової штанги: 1 – фрагмент бурової штанги; 2– прокладка гумова; 3 – канал підвідний; 4 – кожух; 5 – магніт; 6 – насадка дифузорна; 7 – паз монтажний; 8 – вставка твердосплавна

Різець кавітаційний приєднується до бурової штанги 1 за допомогою конічної замкової різьби [50]. Між різцем та буровою штангою виконано зазор для зниження концентрації навантаження на різьбу. У зазор поміщено прокладку гумову 2. Функція останньої - запобігання зростання тиску між буровою штангою та підвідним каналом 3. Кожух 4 застосовується для фіксації положення магнітів 5 [53] та захисту їх від механічних пошкоджень. Магніти 5 служать для забезпечення фокусування кавітаційних бульбашок. Фізика процесу описана у підрозділі 1.2. У насадці дифузорній 6 виникає кавітаційний режим потоку, завдяки її геометричним особливостям. Вона кріпиться за допомогою конічної різьби [50] та має пази монтажні 7 під ключ спеціального виконання. За необхідності зміни довжини дифузору, дифузорна насадка

замінюється. Основною ріжучою частиною різця є твердосплавні вставки 8. Рекомендовані матеріали для їх виготовлення, згідно ГОСТ Р 51047-97 [54]: марки сплавів ВК8В, ВК11ВК, ВК10КС або ВК12КС [54-55]. Матеріали, з яких рекомендовано виконувати решту частин різця (крім магнітів 5) згідно ГОСТ Р 51047-97 [54] та ГОСТ Р 50300-92 [55]: сталі марок 40Х, 40ХН, 30ХГСА, 35ХГСА, 50Х4МФА або 60Н6МА.

3D модель різця кавітаційного для промислового виробництва розроблена на базі РШ 140 і представлена на рис. 2.4. РШ-140 підходить для міцних монолітних ГП з коефіцієнтом міцності по шкалі Протоцько до 16. Розроблений різець підходить для того ж класу ГП.



Рисунок 2.4 - Різець РШ-140

На виході дифузору різця кавітаційного під дією розтягуючих напружень виникає розрідження в обмеженій області рідини. У результаті цього утворюються пустоти – каверни чи кавітаційні бульбашки, які заповнені парами рідини і розчиненими в ній газами. Температура схлопування та тиск каверн залежить від параметрів дифузору: довжини дифузору  $l$  і кута розкриття  $\beta$ . Для виникнення кавітації необхідно забезпечити виконання умови:  $Re > 7340$  [56-57], де  $Re$  – число Рейнольдса. Тому у розділі 3 буде розраховано необхідне значення подачі потоку рідини до виходу різця, від якого залежить  $Re$ . Зубки різця з твердосплавними вставками виконують дві основні функції. Перша – це

безпосереднє різання ГП. Друга - передача імпульсів. Тобто, зубки є хвилеводами. Їх довжина не повинна перевищувати довжину кавітаційної зони для того, щоб пікова точка кавітаційних каверн «виходила» на поверхню ГП, що руйнується. Тим самим створюючи зону передруйнування та зменшуючи опір різанню.

Кавітаційний потік під дією постійного магнітного поля прецесує з субрезонансною частотою близькою до власної частоти коливань кристалічної структури ГП. Це спричиняє активізацію внутрішнього енергетичного потенціалу ГП, що руйнуються. Міжмолекулярні зв'язки ГП руйнуються за рахунок виникнення субрезонансних навантажень від коливальних імпульсів кавітаційного потоку. Виникають додаткові до природніх технологічні тріщини. Зростаючи, вони утворюють магістральну тріщину і направляють її вихід до відкритої поверхні. При цьому енергоємність руйнування знижується.

### **2.3 Програма експериментальних досліджень**

Із експериментальних даних [58] відомо, що при куті розкриття дифузору  $\beta=60^0$ , частота автоколивань системи досягає максимуму. Тому, це значення прийняте, для усіх кавітаторів.

Під час вибору граничних умов незалежних змінних параметрів, ураховано наступні типи обмежень:

а) принципові, що не можуть бути змінені в ході проведення експерименту: структура масиву, його фізико – механічні характеристики;

б) техніко-економічні: вартість руйнування ГП, вартість обладнання та контрольно-вимірювальних приладів;

в) експериментальні: застосування існуючого програмного та лабораторного забезпечення для обробки результатів досліджень.

Вибір інтервалу варіювання незалежних змінних параметрів та їх значення на усіх рівнях варіювання представлені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 - Значення незалежних змінних параметрів та інтервалів варіювання

Найменування і позначення чинників	Рівні варіювання			Інтервали варіювання
	-1	0	+1	
1	2	3	4	5
Магнітна індукція у дифузорі $B$ , мТл	15	30	45	15
Довжина дифузора $l$ , м	0.01	0.03	0.05	0.02

Рівняння регресії у загальному вигляді представлене у вигляді (2.1). На його основі введено умовні позначення:  $x_0=l$ ;  $x_1=B$ ;  $x_2=l_2$ ;  $x_3=B \cdot l_2$ ;  $x_4=B^2$ ;  $x_5=l_2^2$  та побудовано матрицю планування експерименту в явному вигляді, табл. 2.3.

Таблиця 2.3 - Матриця планування експерименту в явному вигляді

№ досліді	Порядок проведення дослідів	Планування					
		$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	2	3	4	5	6	7	8
1 етап							
1	4	1	0.015	0.01	0.015	0.000225	0.01
2	6	1	0.015	0.01	0.045	0.000225	0.09
3	2	1	0.015	0.01	0.075	0.000225	0.25
2 етап							
4	8	1	15	0.03	0.003	0.0009	0.01
5	9	1	30	0.03	0.009	0.0009	0.09
6	7	1	45	0.03	0.015	0.0009	0.25
3 етап							
7	3	1	15	0.05	0.0045	0.002025	0.01
8	5	1	30	0.05	0.0135	0.002025	0.09
9	1	1	45	0.05	0.0225	0.002025	0.25

План проведення експериментальних досліджень зміни ППЕ ГП під дією МГК навантаження передбачає 3 етапи. Це зроблено з метою економії матеріальних ресурсів та часу. Для першого етапу дослідження на стенд буде встановлено кавітатор № 1 з довжиною дифузору 0.01 м. На ньому виконано обмотку постійного струму з 200 витків мідного проводу, площа поперечного



перерізу  $0.5 \text{ мм}^2$ . Перший дослід проводитиметься при магнітній індукції 15 мТл, другий – 30 мТл, третій – 45 мТл. Магнітна індукція змінюватиметься за допомогою випрямляча ВСА-5К. Для другого етапу дослідження на лабораторний стенд буде встановлено кавітатор № 2 з довжиною дифузору 0.03 м. На ньому виконано обмотку постійного струму з 250 витків мідного проводу, площа поперечного перерізу  $0.5 \text{ мм}^2$ . Четвертий дослід проводитиметься при магнітній індукції 15 мТл, п'ятий – 30 мТл, шостий – 45 мТл. Для третього етапу дослідження на лабораторний стенд буде встановлено кавітатор № 3 з довжиною дифузору 0.05 м. На ньому виконано обмотку постійного струму з 300 витків мідного проводу, площа поперечного перерізу  $0.5 \text{ мм}^2$ . Сьомий дослід проводитиметься при магнітній індукції 15 мТл, восьмий – 30 мТл, дев'ятий – 45 мТл. Геометричні параметри кавітаторів занесені у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 - Геометричні параметри кавітаторів

Номер кавітатора	Довжина дифузору $l$ , мм	Діаметр критичного перерізу дифузору $D_1$ , мм	Діаметр виходу дифузора $D_2$ , мм	Кут розкриття $\beta$ , градус
1	2	3	4	5
№ 1	10	9	20	60
№ 2	30	9	45	60
№ 3	50	9	70	60

Важливими параметрами для створення кавітації є напір та швидкість потоку рідини на виході дифузору. Від їх значень залежить режим руху рідини та число Рейнольдса  $Re$  (як вказано вище, умовою кавітації є  $Re > 7340$  [57]).

Розрахунки необхідних значень напору та швидкості потоку рідини представлені у розділі 3.

Дослідження зміни ППЕ  $\gamma$  ( $\text{Дж/м}^2$ ) під дією МГК навантаження при зміні магнітної індукції  $B$  (мТл) та довжини дифузору  $l$  (м) проводитиметься для вапняку, пісковика, граніту та гнейсу. Обґрунтування вибору та підготовка зразків ГП представлені нижче у підрозділі 4.1. За результатами проведення

дослідів буде отримано два графіки, що відповідають кожному етапу досліджень (табл. 2.3):

- перший -  $\gamma=f(B)$  при  $l=\text{const}$ ;

- другий -  $\gamma=f(l)$  при  $B=\text{const}$ .

На кожному графіку буде знаходитись по чотири криві, що відповідають кожному з видів ГП: вапняку, пісковика, граніту та гнейсу, відповідно.

Експериментально значення ППЕ визначатиметься через модуль пружності I роду, відстань між сусідніми площинами розщеплення та радіус дії молекулярних зв'язків за (1.22). Для вимірювання модуля пружності I роду використано неруйнівний метод наноіндентування [50] установкою «Мікрон Гамма», рис 2.5.

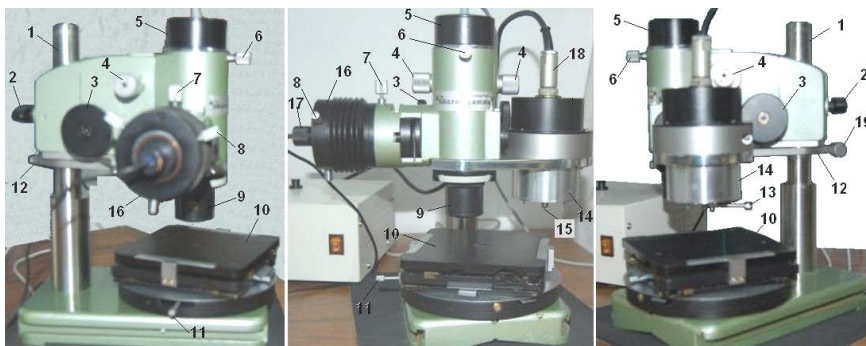


Рисунок 2.5- Наноіндентометр «Мікрон – Гамма» (1 - стійка, 2 - ручка фіксації мікроскопа на стійці, 3 - ручка грубого переміщення мікроскопа та індентора, 4 - ручка точного переміщення мікроскопа, 5 - відеокамера, 6 - гвинт кріплення камери, 7 - гвинт кріплення освітлювача, 8 - центруючі гвинти освітлювача, 9 - об'єктив, 10 - двокоординатний стіл, 11 - гвинт фіксації повороту стола, 12 - обмежувач прицільного уколу, 13 - рукоятка щупа, 14 - блок навантаження, 15 - індентор, 16 - освітлювач мікроскопа, 17 - патрон з лампою, 18 - роз'єм головки, 19 - гвинт фіксації обмежувача)

Метод наноіндентування заснований на безперервній автоматичній реєстрації залежності навантаження на індентор від глибини вдавлювання з побудовою діаграми навантаження [50]. Перевагами даного методу є те, що він дозволяє: вимірювати глибину вдавлювання індентора при максимальному навантаженні; досліджувати пружно-пластичні властивості матеріалу; визначати роботу, витрачену на подолання опору матеріалу вдавлюванню (по площі над кривою навантаження); визначати роботу пружно-пластичних деформацій (по площі над кривою розвантаження); оцінювати дисперсію та неоднорідність міцнісних властивостей.

Радіус дії молекулярних сил та відстань між сусідніми площинами розщеплення визначатимуться за допомогою рентгеноструктурного дифрактометра «Rigaku Ultima IV», рис. 2.6.

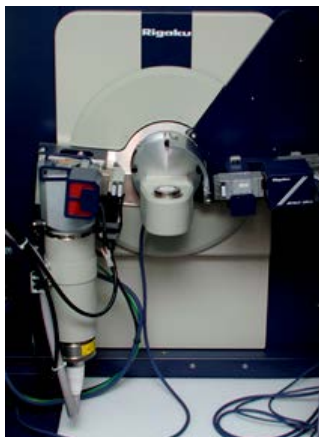


Рисунок 2.6 - Рентгеноструктурний дифрактометр «Rigaku Ultima IV»

Під час визначення модуля пружності I роду використано індентор Берковича. Цей вид індентора дозволяє проводити дослідження не тільки на мікротвердість, а й на тріщиностійкість. Діапазон діючої на індентор сили (0.01...5) Н, глибина занурення (h) (0.01...200) мкм, швидкість навантаження (0.01...100) сН/с, час витримування зразка під навантаженням (0...600) с.,

діапазон сканування 30х30 мм, швидкість сканування (20...60) мкм/с. Програмна методика розрахунків міцнісних характеристик матеріалів базується на статистичному методі. Останній - заснований на використанні закону Гука під час розтягнення та кручення. Перевага статичного методу над динамічним полягає у тому, що урахується зв'язок між поздовжньою і поперечною деформаціями.

## 2.4 Методика статистичного аналізу

Статистичний аналіз рівняння регресії складається з оцінки: похибки досліджу; значущості коефіцієнтів рівняння регресії; адекватності моделі.

Коефіцієнти рівняння регресії визначаються, в.о. [45]:

$$b_i = \frac{1}{N} \cdot \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot \bar{y}_u, \quad (2.5)$$

де  $N$  – кількість дослідів, шт.;

$u$  – номер досліджу;

$x_{iu}$  - значення довжини дифузору при  $u$ -тому досліді, м;

$\bar{y}_u$  - середнє значення змінної стану при всіх паралельних дослідях, Дж/м<sup>2</sup>.

Розрахункова середня змінна стану, Дж/м<sup>2</sup> [45]:

$$\bar{y}_u = \frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^m y_{um}, \quad (2.6)$$

де  $m$  – кількість паралельних (повторних) дослідів, шт.;

$y_{um}$  - значення змінної стану (параметру оптимізації) при  $m$ -тому повторному досліді, Дж/м<sup>2</sup>;

Оцінку кількості повторних експериментів визначено за методикою побудованою на основі коефіцієнта варіації  $\delta$ , який визначається зі співвідношення, в. о. [59]:

$$\delta = \frac{S_y}{\bar{y}_u}, \quad (2.7)$$

де  $S_y$  – емпіричне середньоквадратичне відхилення цільової функції, для досліджуваного випадку – енергоємності руйнування, Дж/м<sup>3</sup>.

Середньоквадратичне відхилення  $S_y$  визначається з [60]:

$$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{u=1}^N (y_{um} - \bar{y}_u)^2. \quad (2.8)$$

Вибираючи відповідне значення рівня ймовірності  $P$  і відносну похибку  $k$ , визначено мінімально допустимий коефіцієнт варіації  $\delta_k$ , який відповідає числу повторних дослідів  $m$ , в. о. [59]:

$$\delta_k = \frac{k \cdot \sqrt{m}}{t}, \quad (2.9)$$

де  $t$  – критерій Стюдента, який визначається залежно від рівня ймовірності  $P$  та числа ступенів вільності  $f=m-1$ , в. о.

Обрана кількість повторних дослідів достатня, якщо виконується умова:

$$\delta \leq \delta_k. \quad (2.10)$$

Якщо умова (2.8) не виконується, то кількість паралельних дослідів  $m$  необхідно збільшити.

Перед розрахунком похибки дослідів проводиться перевірка дисперсії. Остання являє собою розсіювання дослідів у кожній точці простору [45]:

$$S_y^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{k=1}^m (y_{um} - \bar{y})^2. \quad (2.11)$$

Перевірка однорідності дисперсій виконується по критерію Кохрена [45]:

$$G_p < G_T(q, f_1, f_2); \quad (2.12)$$

$$G_p = S_{y \max}^2 / \sum_{u=1}^N S_y^2, \quad (2.13)$$

де  $G_T(q, f_1, f_2)$  - табличне значення критерію Кохрена, в.о.;

$q=0.05$  - рівень значущості для технічних розрахунків, в.о. [45];

$f_1 = m - 2, f_2 = N$  - числа ступенів свободи, шт., шт.;

$S_{y \max}^2$  - максимальне значення дисперсії, Дж/м².

Середнє значення дисперсії визначає похибку дослідів [45]:

$$S_0^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N S_y^2. \quad (2.14)$$

Якщо виконується умова (2.11), то дисперсія є однорідною. Якщо умова не виконується, то необхідно збільшити число паралельних дослідів  $m$ , або змінити метод контролю змінної стану.

Оцінку значущості коефіцієнтів виконують двома рівноцінними способами. Спочатку визначають дисперсію коефіцієнтів рівняння регресії [45]:

$$S_b^2 = S_0^2 / N. \quad (2.15)$$

Перший спосіб оцінки значущості коефіцієнтів:

$$t_{ip} > t_T(q, f), \quad (2.16)$$

$$t_{ip} = \frac{|b_i|}{S_b}, \quad (2.17)$$

де  $t_T(q, f)$  - табличне значення критерію Стюдента, в.о.[45];

$f = N \cdot (m - 1)$  - число ступенів свободи, в.о.;

$|b_i|$  - модуль значення  $i$ -го коефіцієнту регресії, в.о.

Для перевірки значущості коефіцієнтів регресії за другим способом використано довірчий інтервал [45]:

$$|b_i| > |\Delta b_i|; \quad (2.18)$$

$$\Delta b_i = \pm t_T \cdot S_b. \quad (2.19)$$

Якщо виконуються умови (2.18 та 2.19), то  $i$ -й коефіцієнт вважається значущим. Якщо умови не виконуються, то відповідний коефіцієнт вважається незначущим й виключається з рівняння регресії.

Точність апроксимації експериментальних даних визначається за допомогою дисперсії адекватності [45]:

$$S_{ad}^2 = \frac{m}{N - l} \cdot \sum_{u=1}^N \left( \bar{y}_u - \tilde{y}_u \right)^2, \quad (2.20)$$

де  $l$  – число членів рівняння регресії, які залишилися після оцінки значущості, шт.;

$\tilde{Y}_u$  - змінна стану, розрахована відповідно до рівняння регресії, Дж/м<sup>2</sup>.

Перевірка адекватності виконується по критерію Фішера [45]:

$$F_p < F_T(q, f_1, f_2); \quad (2.21)$$

$$F_p = S_{ad}^2 / S_0^2, \quad (2.22)$$

де  $F_T(q, f_1, f_2)$  - табличне значення критерію Фішера [45].

Якщо умова (2.21) виконується, то рівняння регресії вважається адекватним. Тобто, розсіювання експериментальних даних змінної стану відносно рівняння регресії того ж порядку, що й розсіювання, викликане змінами в об'єкті дослідження (похибка досліду). Адекватне рівняння регресії використовується для пошуку області оптимуму об'єкту дослідження. Якщо умова не виконується – необхідно зменшити інтервали варіювання чинників й повторити дослід.

## Висновки

1. Обрано ненасичений центральний композиційний план для дослідження енергоємності руйнування гірських порід, в залежності від їх питомої поверхневої енергії при зміні довжини дифузору та магнітної індукції у дифузорі кавітатора різця кавітаційного. Мінімальна кількість рівнів варіювання змінних – три. Кількість дослідів – 9, кількість повторних дослідів у кожній точці - 3. Ядром плану є повночинниковий експеримент вигляду 2<sup>к</sup>.

2. У якості незалежних змінних параметрів дослідження обрані довжина дифузору та магнітна індукція у дифузорі кавітатора різця кавітаційного. Рівні варіювання: довжини дифузору - 0.01 м, 0.03 м, 0.05 м; магнітної індукції у дифузорі різця кавітаційного - 15 мТл, 30 мТл, 45 мТл.



### РОЗДІЛ 3

## КЕРУВАННЯ ПИТОМОЮ ПОВЕРХНЕВОЮ ЕНЕРГІЄЮ

### 3.1 Базові параметри, що визначають питому поверхневу енергію

Як відомо з [62], зміна ППЕ впливає на руйнування твердого тіла. З часів досліджень Алана Гріффітса ППЕ розглядається як «константа матеріалу». Вчені надають їй різну інтерпретацію. Згідно експериментальних даних [62], ППЕ залежить від оточуючого матеріал середовища і впливає на швидкість поширення тріщини. Ці експериментальні дані спростовують припущення, що ППЕ є «константою матеріалу».

Для зменшення енергоємності руйнування ГП необхідно знайти параметри, під час зміни яких зменшується ППЕ. Згідно (1.22) одним із параметрів від якого залежить ППЕ є відстань між сусідніми площинами розщеплення  $Y_0$ . Із формули Вульфа-Брегга  $Y_0$ , м [63]:

$$Y_0 = \eta \cdot \lambda / (2 \cdot \sin \theta), \quad (3.1)$$

де  $\eta$  - порядок дифракційного спектра потоку електронів матеріалу, в. о.;

$\lambda$  - довжина хвилі потоку електронів матеріалу, м;

$\theta$  – кут відбиття дифракційного потоку електронів матеріалу, градус.

З урахуванням (3.1) ППЕ (1.22)  $\gamma$  приймає вигляд, Дж/м<sup>2</sup>:

$$\gamma = \frac{2 \cdot E \cdot \alpha_0^2 \cdot \sin \theta}{\eta \cdot \lambda \cdot \pi^2}. \quad (3.2)$$

У (3.2) враховано молекулярні параметри ГП, але є необхідність урахування в ППЕ технологічних параметрів руйнування та тріщинуватості.

Одним із параметрів, яким характеризується вектор площини розщеплення кристалічної решітки ГП при руйнуванні є індекс Міллера. Цей індекс ураховано при розрахунку модуля пружності I роду за формулою, що містить молекулярні параметри, Па [64]:

$$E = \frac{2 \cdot c}{c + 1} \cdot K, \quad (3.3)$$

де  $c$  – число простору решітки,  $c=1, 2$  або  $3$ , в. о.;

$K$  – коефіцієнт поверхневого натягу матеріалу, Н/м.

Фізичний зміст  $c$  пов'язаний з площинами розщеплення та індексами Міллера. Якщо площина розщеплення перетинає три грані кристалічної решітки, то число простору решітки  $c=3$ , якщо дві, то  $c=2$ , якщо одну, то  $c=1$  (Наприклад: для площини (111)  $c=3$ , для площини (101)  $c=2$ , для площини (100)  $c=1$ ).

Математична модель (3.3) потребує уточнення, так як вона має емпіричний характер та розмірності її лівої та правої частини не узгоджено. У знаменнику правої частини не вистачає параметра довжини, яким є параметр кристалічної решітки  $a$ . Пружні властивості тіла залежать від дії молекулярних зв'язків, які характеризуються  $a$ . Чим більша відстань між молекулами в упакуванні кристалічної решітки, тим слабша дія Ван-дер-Ваальсових сил і тим менше значення модуля пружності I роду, і навпаки.

Після урахування  $a$  модуль пружності I роду з урахуванням молекулярних параметрів, Па:

$$E = \frac{2 \cdot c}{c + 1} \cdot \frac{K}{a}. \quad (3.4)$$

Коефіцієнт поверхневого натягу  $K$  має однаковий фізичний зміст з ППЕ.

Тобто, це сила, що діє на одиницю довжини контуру поверхні і прагне скоротити поверхню до мінімуму [65]:

$$K = Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta, \quad (3.5)$$

де  $Z$  - кількість атомних шарів у поверхневому шарі  $1 \text{ м}^2$  матеріалу, в. о.;

$Q$  - питома теплоємність плавлення, що руйнується, Дж/кг;

$\rho$  - густина матеріалу, що руйнується, кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  – товщина поверхневого шару матеріалу, м.

Під час розробки математичних моделей руйнування ГП, континуальний підхід класичної механіки суцільних середовищ не може бути повністю застосований. Тому, проведено аналіз молекулярних параметрів ГП, що дозволять урахувати дискретність їх атомарної кристалічної будови під час руйнування.

ГП, здебільшого, мають тривимірну кристалічну решітку. У таких матеріалів кількість атомних шарів у поверхневому шарі площею  $1 \text{ м}^2$ ,  $Z=10^6$ . Для двовимірних кристалів площею  $1 \text{ м}^2$ ,  $Z=10^4$  [66].

Після узгодження (3.5) з (3.4):

$$E = \frac{2 \cdot c}{(c+1) \cdot a} \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta. \quad (3.6)$$

Відмінність існуючих математичних моделей модуля пружності I роду від запропонованої полягає у різності підходів: континуальний підхід класичної механіки суцільних середовищ та дискретний підхід з урахуванням параметрів молекулярної будови ГП, відповідно.

Ще одним параметром від якого залежить ППЕ, згідно (1.22), є радіус дії молекулярних зв'язків  $\alpha_0$ . За фізичною суттю це максимальна відстань між центрами тяжіння сусідніх елементарних частинок на якій діють взаємні сили притягання. Відстань дії міжмолекулярних зв'язків  $b$  [67] є тією ж самою

величиною. Тому, у подальших розрахунках буде використовуватись радіус дії молекулярних зв'язків  $\alpha_0$ .

Радіус дії молекулярних зв'язків, м [67]:

$$\alpha_0 = \frac{\hbar^2 \cdot \nu^2}{\pi \cdot d^2 \cdot m \cdot V^2 \cdot \sigma_p \cdot H}, \quad (3.7)$$

де  $\hbar = 6,6256 \cdot 10^{-34}$  - постійна Планка, Дж·с [68];

$\nu$  – власна частота коливань молекули, Гц;

$d$  - діаметр молекули, м;

$m$  – маса молекули, кг;

$V$  – швидкість навантаження породного масиву, м/с;

$\sigma_p$  - межа міцності на розрив молекулярних зв'язків, Па;

$H$  – загальне число атомів в упакуванні кристалів середовища на площі ГП 1 м<sup>2</sup> (порядку  $10^{19}$  [69]), в. о.

У (3.7) потребує уточнення технологічний параметр - швидкість навантаження породного масиву  $V$ . Він дорівнює кореню з суми квадратів швидкості подачі  $V_n$  та різання  $V_r$  робочого інструменту.  $V_n$  та  $V_r$  визначають ступінь взаємодії передньої грані породоруйнуючого інструменту з гірським масивом через напрям руху результуючого вектора руйнування - кут  $\varphi$ , градус [70]:

$$\varphi = \arctg \left( \frac{|v_n|}{|v_p|} \right), \quad (3.8)$$

де  $v_n$  – швидкість подачі, м/с;

$v_p$  – швидкість різання, м/с.

Зміни фізико-механічних властивостей ГП, викликані перепадами температури, вивітрюванням, перерозподілом навантажень, тектонічними

рухами, насиченням чи втратою рідини, супроводжуються виникненням різного роду тріщин, зниженні щільності та дилатансією (збільшення об'єму під час деформації зсуву). Характеристикою цих процесів є деформація зсуву. Тому, зроблено висновок, що у (3.7) не враховано деформацію зсуву  $\varepsilon$  ( $\varepsilon=10^{-5}$ , в. о. [71]).

Межа міцності на розрив  $\sigma_p$ , Па [72]:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot K}{\pi \cdot l_k}}. \quad (3.9)$$

В кристалічних решітках реальних кристалів існують лінійні дефекти – дислокації (додаткові кристалічні площини в кристалічних ґратках). Їх переміщення відбувається під дією напружень. Наявність дислокацій є передумовою появи тріщин [73]. Руйнування ГП в результаті росту тріщин відбувається наступним чином. В ГП створюється об'єм з підвищеною концентрацією енергії. Цей об'єм розширюється, створює в ГП розтягуючі напруження, під дією яких зростають тріщини і відбувається руйнування. Накопичена в ГП потенційна енергія витрачається на утворення нових поверхонь та об'ємів. Створення у ГП напружень розтягу спричиняє зростання тріщин [73]. Джерелом тріщин може бути механічна, теплова, електрична, хімічна дія тощо. У роботі дослідження адаптовані до джерела тріщин, що утворюються в масиві від дії імпульсних навантажень. Враховано наявність тріщин в ГП через параметр  $l_k$  – критична довжина тріщини, м. В механіці руйнування довжина тріщини вважається критичною, якщо під час її розвитку кількість виділеної пружної енергії більше кількості витрат енергії пластичної деформації [74].

$$l_k = \left( \frac{R}{[\sigma]} \right)^2, \quad (3.10)$$

де  $R$  - в'язкість руйнування, що характеризує пластичність матеріалу, Па· $\sqrt{м}$ ;  
 $[\sigma]$  - тимчасовий опір руйнуванню, МПа.

Після узгодження (3.6) та (3.10) з (3.9), отримано, Па:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{4 \cdot c}{(c+1) \cdot a \cdot \pi \cdot l_k}} \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta. \quad (3.11)$$

Відмінність відомої [26] та запропонованої математичних моделей межі міцності на розрив молекулярних зв'язків полягає у тому, що в [26] не враховано фізичні параметри ГП (питому теплоємність плавлення матеріалу  $Q$ , густину  $\rho$ ) та їх деструктивність. Остання виражається через довжину критичної тріщини  $l_k$ . За рахунок цього кінцевий результат розрахунку межі міцності на розрив міжмолекулярного зв'язку у порівнянні [26] зростає до 40 %.

Після узгодження (3.11) з (3.7), отримано, м:

$$\alpha_0 = \frac{\hbar^2 \cdot v^2 \cdot Na \cdot \varepsilon \cdot F}{\pi \cdot d^2 \cdot m \cdot V^2 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot c}{(c+1) \cdot a \cdot \pi \cdot l_k}} \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot H}. \quad (3.12)$$

Залежність (3.12) відрізняється від (3.7) тим, що враховує фізичні та молекулярні параметри ГП – коефіцієнт тертя інструмента об ГП  $F$  ( $F=0.1$  [26]), густину  $\rho$ , питому енергоємність плавлення  $Q$ , число простору решітки  $c$ , довжину критичної тріщини  $l_k$ , параметр кристалічної решітки  $a$ , товщину поверхневого шару матеріалу, число Авогадро ( $Na=6.62 \cdot 10^{23}$ , моль [75]) та кількість атомних шарів у поверхневому шарі матеріалу  $H$ . Це дає змогу комплексно врахувати макро- та мікропараметри, від яких залежить відстань дії молекулярних зв'язків  $\alpha_0$ .

Математична модель ППЕ після узгодження (3.6), (3.12) з (1.20), Дж/м<sup>2</sup>:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_k \cdot N_a^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot F^2}{Y_0 \cdot \pi^3 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot V^4 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta} \quad (3.13)$$

Для наближення математичної моделі ППЕ до реального процесу руйнування ГП запропоновано додатково урахувати технологічний коефіцієнт  $T_k$ , в. о.:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_k \cdot N_a^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot F^2 \cdot T_k}{Y_0 \cdot \pi^3 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot V^4 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta}; \quad (3.14)$$

$$T_k = \frac{\sqrt{N_n^2 + N_p^2} \cdot t \cdot v \cdot s \cdot P_k \cdot \eta_n \cdot \arctg \left( \frac{|v_n|}{|v_p|} \right) \cdot K \cdot F}{j \cdot P_{yn} \cdot \sqrt{M_n^2 + M_p^2} \cdot v_{np}}, \quad (3.15)$$

де  $N_n$  – потужність приводу подачі, Вт;

$N_p$  – потужність приводу різання, Вт;

$t$  – ширина ріжучої кромки, м;

$v$  – коефіцієнт Пуассона, в.о.;

$s$  – глибина руйнування ГП, м;

$P_k$  – контактна міцність ГП, Па;

$\eta_n$  – ККД двигуна, в.о.;

$K$  – кількість ріжучих кромок, шт.

$j$  – відстань між ріжучими кромками, м;

$P_{yn}$  – навантаження на робочий інструмент, Н;

$M_n$  – крутний момент приводу подачі, Н·м;

$M_p$  – крутний момент приводу різання, Н·м;

$v_{пр}$  – швидкість потоку промивної рідини, м/с.

За (3.14) з урахуванням (3.15) побудовано, для мергелю, граніту та гнейсу, залежності ППЕ від швидкості різання ГП, рис 3.1, потужності приводу подачі, рис 3.2. А також від: крутного моменту приводу; швидкості подачі робочого інструмента; навантаження на робочий інструмент; кількості ріжучих кромки; ширини ріжучої кромки інструменту; відстані між ріжучими кромками, відповідно рисунки 3.3-3.8

На рис. 3.1 наведено залежність ППЕ від швидкості різання ГП  $\gamma=f(V_r)$

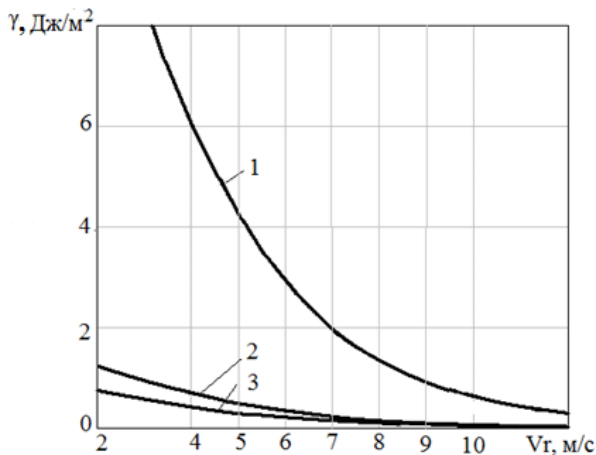


Рисунок 3.1 - Залежність питомої поверхневої енергії від швидкості різання гірської породи  $\gamma=f(V_r)$  (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

Залежність  $\gamma=f(V_r)$  є спадною функцією. Це пояснюється кінетичною природою руйнування [11]. Тобто, зі збільшенням швидкості різання зростає сила тертя, а відповідно і температура ГП. На молекулярному рівні у цей час підвищується власна частота коливань. Це викликає локальні напруження, що можуть сягати значень співрозмірних з межею міцності зв'язків на розрив або наближатися до них. З аналізу залежностей (рис. 3.1) це відбувається при швидкості 8 м/с, коли тангенс кута дотичної до кривої зменшується на 40 %. Тобто, відбувається зростання енергії активації процесу знеміцнення. За рахунок цього утворення одиниці площі нової поверхні проходить з меншими



витратами енергії. Цей процес характеризується залежністю зміни ППЕ від швидкості руйнування, що представлена на рис. 3.1. Зі збільшенням швидкості різання від 4 м/с до 12 м/с ППЕ зменшується від 6 до 0,3 Дж/м<sup>2</sup> для гнейсу, від 0,69 до 0,03 Дж/м<sup>2</sup> для мергелю, від 0,41 до 0,02 Дж/м<sup>2</sup> для граніту.

На рис. 3.2 представлена залежність ППЕ від потужності приводу  $\gamma=f(N_n)$

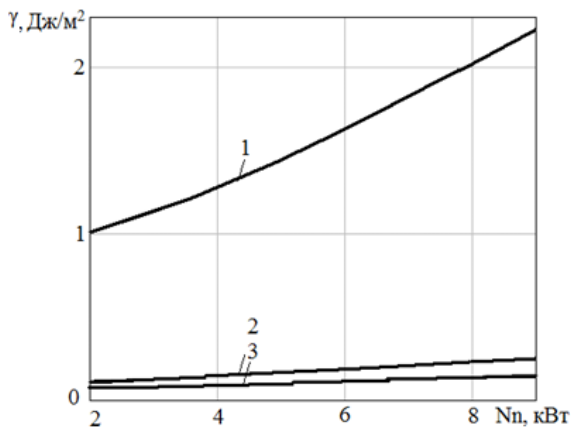


Рисунок 3.2 - Залежність питомої поверхневої енергії від потужності приводу подачі  $\gamma=f(N_n)$  (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

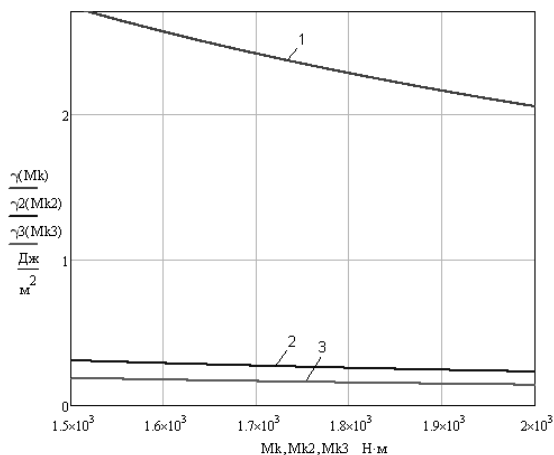


Рисунок 3.3 - Залежність питомої поверхневої енергії від крутного моменту приводу  $\gamma=f(M_k)$  (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

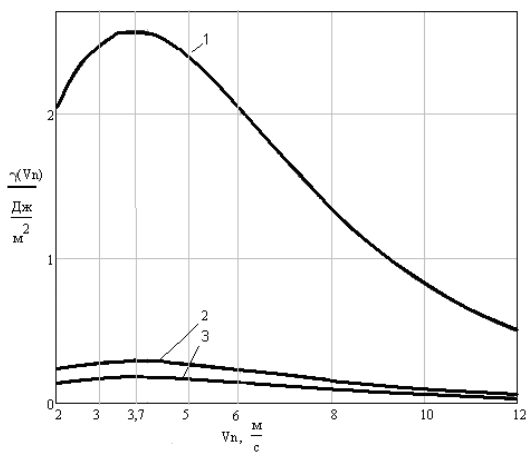


Рисунок 3.4 - Залежність питомої поверхневої енергії від швидкості подачі робочого інструменту  $\gamma=f(V_n)$  (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

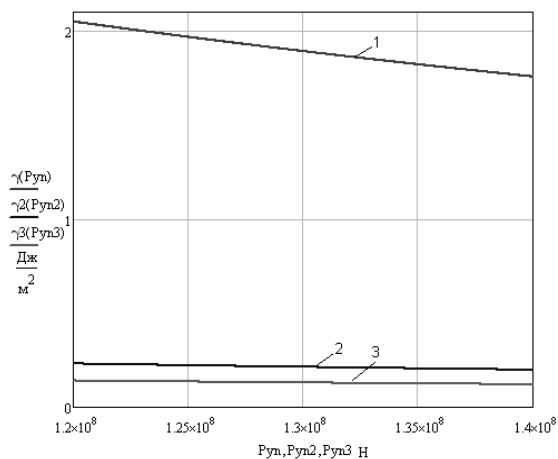


Рисунок 3.5 - Залежність питомої поверхневої енергії від навантаження на робочий інструмент  $\gamma=f(P_{yn})$  (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

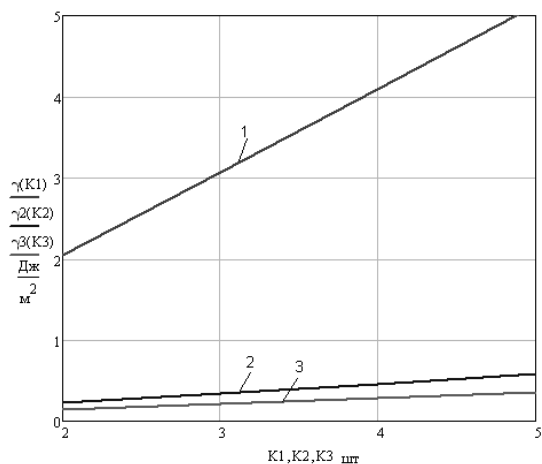


Рисунок 3.6 - Залежність питомої поверхневої енергії від кількості ріжучих кромок  $\gamma=f(K)$  (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

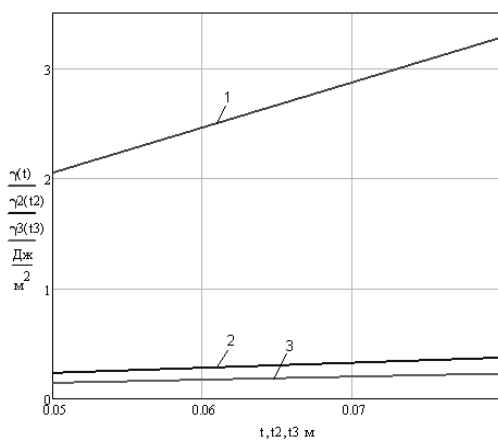


Рисунок 3.7 - Залежність питомої поверхневої енергії від ширини ріжучої кромки інструменту  $\gamma=f(t)$  (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

Під час руйнуванні ГП частина енергії приводу іде на формування ядра ущільнення. При цьому ППЕ накопичується у якості потенційної енергії в масиві. Тому залежність  $\gamma=f(Nn)$  є зростаючою функцією.

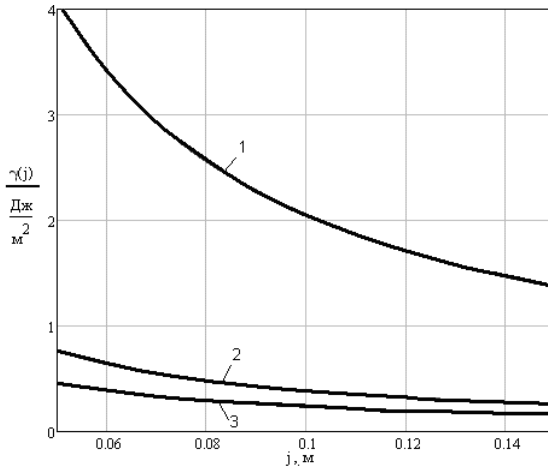


Рисунок 3.8 - Залежність питомої поверхневої енергії від відстані між ріжучими кромками інструменту  $\gamma=f(j)$  (1 – гнейс, 2 – мергель, 3 – граніт)

На базі (3.13) створено математичну модель ППЕ, що залежить від зміни режиму МГК навантаження. Останній визначається геометричними параметрами кавітатора та магнітною індукцією всередині кавітатора робочого органу,  $B$ , Тл [76]:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{L_k}, \quad (3.16)$$

де  $\mu_0=1.257 \cdot 10^{-6}$  – магнітна постійна, Н/А<sup>2</sup> [77];

$I$  – сила струму, А;

$N$  – кількість витків у обмотці, шт.;

$L_k$  – довжина котушки, м.

Від значення магнітної індукції у кавітаторі залежить частота прецесії кавітаційного потоку  $\Omega$ , Гц [20]:

$$\Omega = \zeta \cdot B, \quad (3.17)$$

де  $\zeta$  – гіромагнітне відношення, А·с/кг.

Гіромагнітне відношення являє собою відношення магнітного до механічного моменту частки, Гц/Тл [20]:

$$\varsigma = g_u \cdot \frac{\mu_b}{\hbar} = 2 \cdot \frac{927.4 \cdot 10^{-26}}{6.6256 \cdot 10^{-34}} = 2.8 \cdot 10^{10}, \quad (3.18)$$

де  $g_u$  – чинник, в.о. (g- фактор);

$\mu_b = 927.4 \cdot 10^{-26}$  – магнетон Бора, Дж/Тл [78];

$\hbar = 6.6256 \cdot 10^{-34}$  – постійна Планка, Дж·с [68].

$g_u$  – чинник дорівнює 1, якщо в прецесії беруть участь тільки орбітальні моменти електронів і  $g_e$  – чинник дорівнює 2, якщо прецесують тільки власні магнітні моменти електронів [20]. В умовах даного дослідження має місце другий випадок.

Після підстановки (3.16), (3.18) в (3.17) отримано нову математичну модель частоти прецесії магнітного потоку, Гц:

$$\Omega = g_u \cdot \frac{\mu_b}{\hbar} \cdot \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{L_k} = \frac{K_{em} \cdot I \cdot N}{L_k} \quad (3.19)$$

Для спрощення математичних розрахунків частоти прецесії кавітаційного потоку, добуток постійних складових (3.19) замінено на електромагнітний коефіцієнт  $K_{em}$ , м/Кл :

$$K_{em} = g_u \cdot \frac{\mu_b}{\hbar} = 2 \cdot \frac{927.4 \cdot 10^{-26}}{6.6256 \cdot 10^{-34}} = 2.8 \cdot 10^{10}. \quad (3.20)$$

У результаті аналізу вище перелічених моделей даного розділу та на базі (3.13) розроблено математичну модель ППЕ під час руйнування ГП з МГК навантаженням.

$$\gamma = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_{kp} \cdot N_a^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot F^2}{Y_0 \cdot \pi^3 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot v_{np}^4 \cdot H_2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot \zeta \cdot l_2 \cdot B}. \quad (3.21)$$

Вона відрізняється тим, що ураховує молекулярні (діаметр, масу молекули, власну частоту коливань молекули у кристалічній структурі), фізичні (питому теплоту плавлення, густину) та технологічні параметри (довжину та магнітну індукцію всередині кавітатора робочого органу, швидкість потоку промивної рідини). Зміна останніх дала змогу керувати значенням ППЕ при різних режимах ОМГК руйнування. Експериментальна перевірка цього наведена у розділі 4.

### 3.2 Енергоємність руйнування гірських порід

Енергоємність руйнування ГП  $E_p$  під час ОМГК навантаженні, Дж/м<sup>3</sup> [79]:

$$E_p = \frac{4}{\pi \cdot D_0^2 \cdot \Delta S} \cdot (U \cdot I \cdot t + p \cdot \Delta S), \quad (3.22)$$

де  $U$  – напруга мережі, до якої приєднаний привід обертача робочого інструменту, В;

$I$  – сила струму в мережі, до якої приєднаний привід обертача робочого інструменту, А;

$t$  – тривалість руйнування гірської породи, с;

$p$  – тиск на вибій, Па;

$\Delta S$  – глибина зруйнованої гірської породи за тривалість  $t$ , м;

$D_0$  – діаметр свердловини, м.

Під час аналізу фізичного змісту (3.22) встановлено, що для узгодження розмірностей лівої та правої частин рівняння, доцільно урахувати у другому доданку параметр площі. Таким параметром є контактна площа інструменту та поверхні ГП  $S_{in}$ . Тому що об'єм ГП, який піддається деструкції характеризується контактною площею помноженою на глибину руйнування, відповідно. У результаті, (3.22) приймає вигляд, Дж/м<sup>3</sup>:

$$E_p = \frac{4}{\pi \cdot D_0^2 \cdot \Delta S} \cdot (U \cdot I \cdot t + p_3 \cdot \Delta S \cdot S_{in}), \quad (3.23)$$

де  $p_3$  – тиск на виході дифузору у розрізі 3<sup>I</sup>-3<sup>II</sup> (рис. 3.9), Па;

$V_{zn}$  – об'ємом зруйнованої гірської породи, м<sup>3</sup>;

$S_{in}$  – контактна площа інструменту та гірської породи, м<sup>2</sup>.

Залежності (3.24 – 3.34) прийняті з урахуванням [59, 80, 81].

Зміна тиску в дифузорі зі зміною кута його розкриття  $\Delta p$  та тиски у перерізах 2-2<sup>I</sup> та 3-3<sup>I</sup> (рис. 3.9) -  $p_2, p_3$ , відповідно, Па:

$$\Delta p = p_3 - p_2; \quad (3.24)$$

$$p_2 = p_1 - h_1 \cdot \rho \cdot g; \quad (3.25)$$

$$p_3 = \rho \cdot g \cdot \left( \frac{p_2}{\rho \cdot g} + \frac{(v_{cp2}^2 - v_{cp3}^2)}{2 \cdot g} - h_4 \right), \quad (3.26)$$

де  $p_1$  – тиск, створюваний насосом, Па;

$h_1, h_4$  – втрати напору на тертя у лінійній ділянці та у дифузорі різця кавітаційного, відповідно, м;

$\rho$  - густина промивної рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  - прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;

$v_{cp1}, v_{cp2}, v_{cp3}$  – швидкості потоку промивної рідини через дифузор різця кавітаційного у перерізах 1-1<sup>I</sup>, 2-2<sup>I</sup> та 3-3<sup>I</sup>, відповідно,  $\text{м/с}$ .

Проведені розрахунки дозволили уточнити форму ріжучого інструменту. На рис. 3.9 представлено різець кавітаційний з умовними позначеннями параметрів для визначення швидкостей рідини, гідравлічних опорів та тисків у його дифузорі.

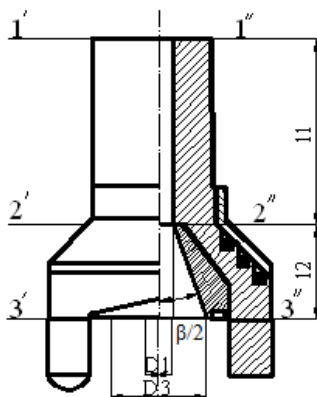


Рисунок 3.9 – Різець кавітаційний з умовними позначеннями параметрів для визначення швидкостей рідини та тисків у дифузорі різця кавітаційного

Швидкості потоку промивної рідини через дифузор різця кавітаційного у перерізах 1-1<sup>I</sup>, 2-2<sup>I</sup> та 3-3<sup>I</sup>,  $\text{м/с}$ :

$$v_{cp1} = v_{cp2} = A_n / S_1 = (A_n \cdot 4) / (\pi \cdot D_1^2); \quad (3.27)$$

$$v_{cp3} = \frac{A_n}{S_3} = \frac{(A_n \cdot 4)}{(\pi \cdot D_3^2)} = \frac{(A_n \cdot 4)}{\left( \pi \cdot \left( D_1 + 2 \cdot \left( l_2 \cdot \tg(\beta/2) \right) \right)^2 \right)}, \quad (3.28)$$

де  $A_n$  – продуктивність насосу,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$S_1, S_2, S_3$  – площі перерізів дифузору різця кавітаційного у перерізах 1-1<sup>I</sup>, 2-2<sup>I</sup> та 3-3<sup>I</sup>, відповідно,  $\text{м}^2$ ;



$D_1, D_2, D_3$  – діаметри площі перерізів у дифузорі різця кавітаційного у перерізах 1-1<sup>l</sup>, 2-2<sup>l</sup> та 3-3<sup>l</sup>, відповідно, м;

$l_2$  – довжина дифузору різця кавітаційного, м;

$\beta$  – кут розкриття дифузора, градус.

Втрати на тертя у лінійній ділянці та у дифузорі різця кавітаційного  $h_1$ ,  $h_4$ , м:

$$h_1 = \lambda \cdot \left( \frac{l_1}{D_1} \right) \cdot \left( \frac{v_{cp1}^2}{2 \cdot g} \right); \quad (3.29)$$

$$h_4 = \xi_4 \cdot \frac{v_{cp3}^2}{2 \cdot g}, \quad (3.30)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт Дарсі, в. о.;

$l_1$  – відстань між перерізами (1-1<sup>l</sup>) – (2-2<sup>l</sup>), м;

$\xi_4$  – коефіцієнт опору дифузору, в.о.

$$\xi_4 = \left( \frac{\lambda}{8 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) + \sin(\beta) \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right)^2 \right), \quad (3.31)$$

де  $n$  – ступінь розширення дифузора, в.о.

Ступінь розширення дифузору (в. о.) та число Рейнольдса (в. о.):

$$n = S_3 / S_2 = D_3^2 / D_2^2; \quad (3.32)$$

$$\text{Re} = v_{cp1} \cdot \left( \frac{D_1}{\nu_p} \right), \quad (3.33)$$

де  $\nu_p$  – кінематична в'язкість рідини (для води  $\nu = 1 \cdot 10^{-6}$  [82]), м<sup>2</sup>/с.

Як вказано вище, для виникнення кавітації необхідно забезпечити виконання умови:  $Re > 7340$  [58]. Згідно з [83], при  $2300 < Re < 10^5$ , коефіцієнт Дарсі визначають за формулою Блазіуса (для турбулентного режиму руху рідини), в. о.:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (3.34)$$

На базі досліджень [59, 80, 81] отримано математичну модель енергоємності руйнування ГП з гідродинамічним кавітаційним навантаженням через урахування геометричних параметрів кавітатора, Дж/м<sup>3</sup>:

$$E_p = \frac{4}{\pi \cdot D_0^2 \cdot \Delta S} \cdot (U \cdot I \cdot t + \Delta S \cdot S_{in} \cdot \left( (p_1 - h_1 \cdot \rho \cdot g) + \rho \cdot \frac{V^2}{2} - \right. \\ \left. - \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{4 \cdot An}{\pi \cdot \left( D_1 + 2 \cdot l_2 \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\beta}{2} \right) \right)^2} \right)^2 \cdot (1 - \xi_4) \right) \quad (3.35)$$

У табл. 3.1 наведені вихідні дані для розрахунку енергоємності руйнування ГП. На рис. (3.10, 3.11) представлені залежності енергоємності руйнування ГП різцем кавітаційним від кута розкриття та довжини дифузору  $l_2$ .

Таблиця 3.1 - Вихідні дані для розрахунку енергоємності руйнування

Назва, значення та одиниці вимірювання вихідного параметру	Назва, значення та одиниці вимірювання вихідного параметру
1	2
1. Діаметр свердловини $D_0=0.05$ м	6. Коефіцієнт Дарсі $\lambda=0.026$ [порах. з 3.28], в. о.

Закінчення таблиці 3.1

1	2
2. Глибина свердловини $\Delta S=0.1$ м	7. Довжина прямолінійної та дифузорної ділянки різця кавітаційного $l_1=0.3$ м, та $l_2=0.15$ , рис. 3.5. (при $\beta=\text{var}$ ), м,
3. Напруга та струм в мережі змінного струму $U=220$ В, $I=5$ А	8. Швидкість рідини у перерізі $2^I-2^{II}$ $V_{cp1}=V_{cp2}=1.18$ м/с
4. Час руйнування $t=3600$ с	9. Густина $\rho=1015$ кг/м <sup>3</sup> [59]
5. Початковий тиск та витрати насосу $p_1=12$ МПа, $Q=0.0003$ м <sup>3</sup> /с	10. Діаметр критичного перерізу дифузору $2^I-2^{II}$ $D_1=D_2=0.018$ м

З (3.26) та за вихідними даними табл. 3.1  $Re=21240>7340$ . Умова виникнення кавітації за критерієм число Рейнольдса – виконується.

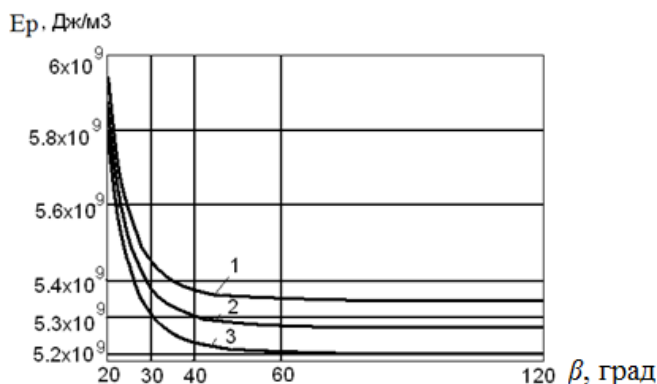


Рисунок 3.10 - Залежність енергоємності руйнування гірських порід різцем кавітаційним від кута розкриття дифузору (1 – при  $p_1=0.25$  МПа; 2 – при  $p_1=0.30$  МПа; 3 – при  $p_1=0.35$  МПа)

Залежності енергоємності руйнування ГП різцем кавітаційним від кута розкриття та довжини дифузору мають спадний гіперболічний характер. Це

пов'язано з тим, що в кавітаційних бульбашках сконцентровано локальні імпульси тиску на вибій, які досягають  $10^3$  МПа [18]. При цьому кавітаційне навантаження сприяє утворенню на його поверхні додатково внесеної технологічної тріщинуватості. Таке комбіноване МГК навантаження знижує енергоємність руйнування до 10 %. При заданих початкових умовах енергоємність знижується за гіперболічним законом до значення кута розкриття  $\beta=60^\circ$  та довжини  $l_2=0.03$  м дифузору. Далі, залежність приймає лінійний характер. Це пов'язано з тим, що при  $\beta=60^\circ$  та  $l_2:D_0=5:3$  кавітаційний процес, згенерований різцем кавітаційним, набуває максимуму автоколивань. Останні мають субрезонансну частоту до власної частоти коливань молекулярної структури ГП.

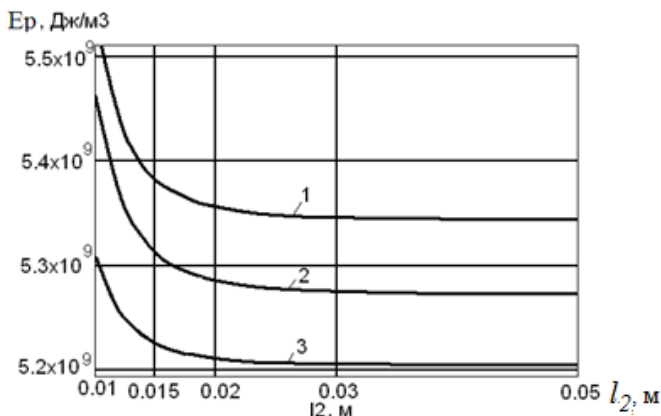


Рисунок 3.11 - Залежність енергоємності руйнування гірських порід різцем кавітаційним від довжини дифузору (1 – при  $p_1=0.25$  МПа; 2 – при  $p_1=0.30$  МПа; 3 – при  $p_1=0.35$  МПа)

Аналіз отриманих залежностей показав доцільність виконання різців кавітаційних з кутом розкриття дифузору  $60^\circ$  та з відношенням довжини дифузору до діаметру критичного перерізу 5:3.

### 3.3 Геометричні та частотні параметри кавітаційної зони

Розрахункова схема для визначення довжини кавітаційної зони представлена на рис. 3.12:

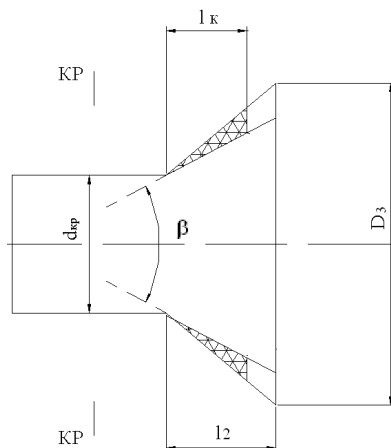


Рисунок 3.12 - Розрахункова схема для визначення довжини кавітаційної каверни

Довжина кавітаційної зони  $l_{кз}$ , м [58, 84]:

$$l_{кз} = \frac{d_{кр}}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)} \cdot \left( \sqrt{\frac{\mu}{1 - \sqrt{(1 - \tau)/\psi}}} - 1 \right), \quad (3.36)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати дифузору кавітатора, в. о. ( $\mu=0.82$  [85]);

$\tau$  – параметр (число) кавітації, в.о.;

$\psi = 1,1$  – коефіцієнт повноти удару на миттєве розширення потоку [86].

Число кавітації, в.о. [58]:

$$\tau = \frac{2 \cdot (p_3 - p_2)}{\rho \cdot V_{cp1}^2}. \quad (3.37)$$

На рис. 3.13 представлена залежність довжини кавітаційної зони від довжини дифузору.

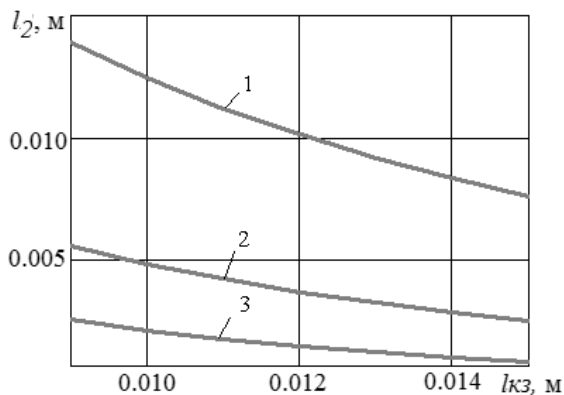


Рисунок 3.13 - Залежність довжини кавітаційних каверн від довжини дифузору (1 – при  $\beta = 30^\circ$ ; 2 – при  $\beta = 45^\circ$ ; 3 – при  $\beta = 60^\circ$ .)

Залежність довжини кавітаційних каверн від довжини дифузору має спадний характер. Пояснюється тим, що зі збільшенням довжини дифузору, зростає гідравлічний опір. Це впливає з аналізу (3.31) - (3.32). Тому енергія кавітаційних каверн починає концентруватися біля критичного перерізу.

Частота кавітації у дифузорі різця кавітаційного, Гц [85]:

$$f = Sh_M \cdot \frac{V_{cp1}}{l_{kз}}, \quad (3.38)$$

де  $Sh_M$  – модифіковане число Струхалю, в.о. [85].

$$Sh_M = \left( \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \cdot tg\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (3.39)$$

У табл. 3.2 представлені частоти гідрокавітаційного генератора в залежності від зміни довжини та кута розкриття дифузору.

Таблиця 3.2 – Частота гідрокавітаційного генератора в залежності від зміни довжини та кута розкриття дифузору, Гц

Довжина дифузору $l_2$ , м	Кут розкриття дифузору $\beta$ , градус		
	$30^0$	$45^0$	$60^0$
0.009	713	1884	3518
0.012	776	1832	3135
0.015	789	1699	2761

З аналізу табл. 3.2 зроблено висновок, що максимальне значення частоти кавітації, з урахуванням усіх початкових технологічних обмежень та вихідних даних, досягається при найбільшому куті розкриття  $60^0$  та найменшій довжині дифузору 0.009 м. Це пояснюється тим, що за таких умов збільшується перепад тисків у дифузори, як результат, зростає напруження розтягу у рідині та частота зриву потоку.

## Висновки

1. Вперше розроблено математичну модель управління ППЕ гірських порід на молекулярному рівні, яка відрізняється від відомих тим, що дозволяє врахувати:

- молекулярні параметри ГП: власну частоту коливань, діаметр, масу молекули;
- властивості ГП: питому теплоємність плавлення, густину;
- швидкість потоку промивної рідини, магнітну індукцію всередині кавітатора робочого інструменту, довжину кавітатора.

2. Досліджені залежності енергоємності руйнування від кута розкриття і довжини дифузора різця кавітаційного . Визначено, що при куті розкриття  $60^0$  і

довжині дифузора 0.03, енергоємність знижується на 10 % в межах  $(5.2 \cdot 10^9 \dots 6 \cdot 10^9)$  Дж/м<sup>3</sup>. Тому, рекомендується виконувати різці з кутом розкриття 60° і з відношенням довжини дифузора до діаметру критичного перерізу 5:3.

3. Залежність довжини кавітаційної зони від довжини дифузора має спадний характер. Зі збільшенням кута розкриття дифузора від 30° до 60°, довжина каверни зменшується з 0.014 м до 0.003 м при довжині дифузора 0.009 м. Частота зриву потоку зростає від 713 до 3518 Гц. Тобто, відбувається концентрація енергії кавітаційного потоку на виході з критичного перерізу дифузornoї насадки робочого інструменту.



## РОЗДІЛ 4


### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### ПИТОМОЇ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД




#### 4.1 Вибір і підготовка зразків гірських порід

Розроблений ОМГК спосіб руйнування забезпечує прецесування кавітаційних бульбашок за ларморовим колом. При цьому частота коливань бульбашок наближається до власної частоти коливань кристалічної структури ГП. Це сприяє руйнуванню їх молекулярних зв'язків. Крім того, локальні схлопування кавітаційних бульбашок викликають утворення штучної тріщинуватості в ГП та зниження ППЕ. Для експериментальної перевірки зміни ППЕ під дією МГК навантаження обрано зразки ГП з різними фізичними властивостями та широким мінеральним складом: граніт, гнейс, вапняк, пісковик. Основні фізичні властивості ГП, які впливають на процес руйнування представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні фізичні властивості та фото зразків обраних гірських порід

Гірська порода	Модуль пружності І роду, МПа [92]	Категорія за шкалою Протодьяконова, в.о. [92]	Походження	Фото зразка Циліндр, діаметр- 5 см, Висота – 1,5 см
1	2	3	4	5
Граніт	300	8-15	Магматична інтрузивна	

Закінчення табл. 4.1

1	2	3	4	5
Гнейс	40-220	2-3	Метаморфічна	
Вапняк	250-600	2-15	Осадова	
Пісковик	30-260	2-15	Осадова	

Зразки, обраних видів ГП, підготовані у вигляді циліндрів діаметром 5 см та висотою 1.5 см. Вони виготовлені з кернів отриманих з Капустинського, Язівського та Мелихівського родовищ. Зразки порізані за допомогою верстата LZS — 2 [93]. Також проведено шліфування та полірування їх верхніх площин, за допомогою верстата QM300X110 [94].

Перший зразок - магматична кварцовмісна ГП – граніт. Кварц ( $\text{SiO}_2$ ) є найпоширенішим мінералом земної кори, частка якого складає 75 % [95]. Запаси граніту сягають близько 100 млн.  $\text{м}^3$ . Річний видобуток – біля 40 тисяч  $\text{м}^3$  в рік [96]. Відноситься до гранітів Капустинського родовища у Кіровоградській області. Характеристиками цих гранітів є водопоглинання – 0.21 %, щільність  $2630 \text{ кг/м}^3$ , межа міцності при стисненні (72...124) МПа [97]. Хімічний аналіз виконано за допомогою електронного пристрою Selmi РЭМ 106 И. Фото зразків ГП до руйнування показано на рисунку 4.1.

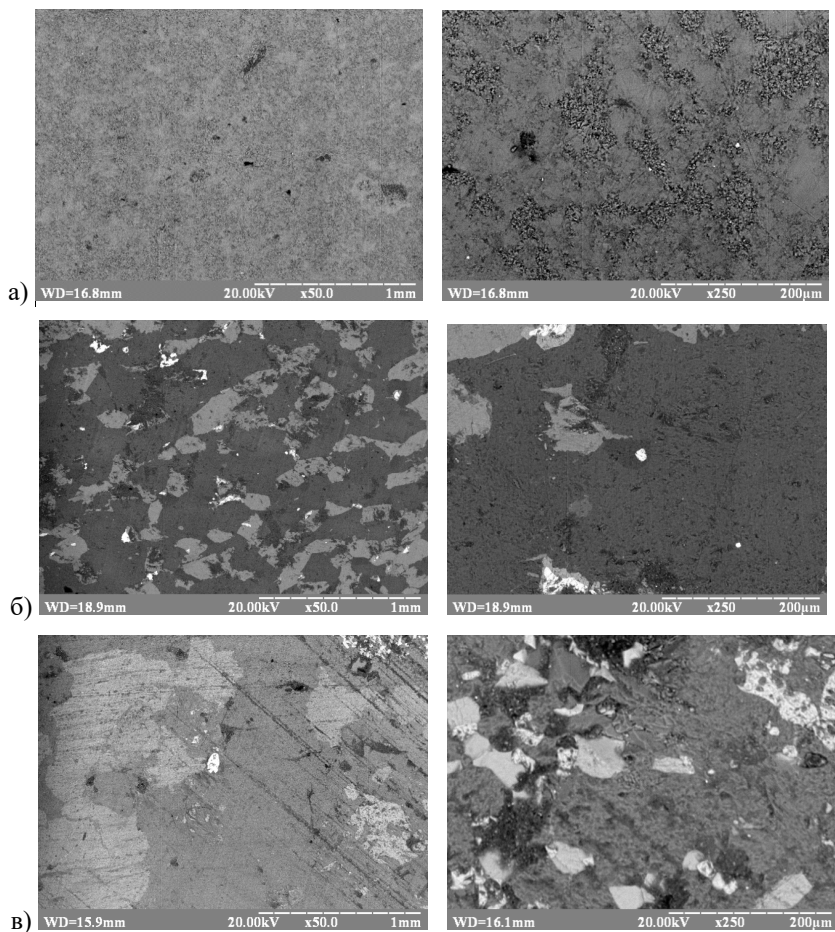


Рисунок 4.1– Фото зразків гірських порід до руйнування в масштабі 1:50 та 1:250 (1 мм та 200мкм в одній поділці, відповідно) а) - вапняк; б) - гнейс; в)– граніт

Зразок граніту на 57 % складається з кремнію, 18 % алюмінію, 15 % феруму та 9 % кальцію і має середньозернисту структуру, рис 4.1. До складу входять мінерали кварцу, слюди та польового шпату. Зерна кварцу мають тригональну сингонію. Кристалічна структура – псевдо гексагональна. Щільність (2600...2650) кг/м<sup>3</sup>. Має кубічну граньоцентровану кристалічну

решітку з недосконалою спайністю [98-99]. Загальний хімічний аналіз зразків ГП а) - вапняк; б) - гнейс; в) – граніт, наведено на рисунку 4.2.

а)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00 Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Пур %	ZAF	ZAF-Пур	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Al K	32	20.02	0.54	99.90	1.4798	1.0003	3	0.000	0.000	
Si K	219	5.81	3.26	99.99	1.4381	1.0000	4	0.000	0.000	
P K	378	4.33	6.87	29.26	1.0032	0.5202	5	0.000	0.000	
S K	92	11.63	1.90	13.74	0.9354	0.6165	6	0.000	0.000	
Ca K	5065	5.15	87.43	51.33	0.9367	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca L	0	71.06	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

б)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00 Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Пур %	ZAF	ZAF-Пур	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Al K	40	47.08	1.38	99.90	1.1243	1.0003	3	0.000	0.000	
Si K	2151	4.38	65.79	99.99	1.0800	1.0000	4	0.000	0.000	
S K	240	14.48	15.28	13.74	0.4684	0.6165	6	0.000	0.000	
Ca K	66	8.60	2.34	51.33	0.7031	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca L	0	151.31	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe K	243	4.09	15.22	99.90	0.7980	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe L	1	38.55	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

в)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00 Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Пур %	ZAF	ZAF-Пур	Валент.	Атом. %	Козф.	Текст
Al K	794	10.15	18.48	99.90	1.0673	1.0003	3	0.000	0.000	
Si K	2066	6.04	57.28	99.99	0.7648	1.0000	4	0.000	0.000	
K K	195	8.62	0.00	0.00	0.0000	0.0000	1	0.000	0.000	
Ca K	417	4.26	8.96	51.33	0.7458	0.9304	2	0.000	0.000	
Ca L	0	213.36	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	
Fe K	382	3.77	15.29	99.90	0.8017	1.0000	2	0.000	0.000	
Fe L	2	43.00	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000	

Рисунок 4.2 - Загальний хімічний аналіз зразків гірських порід а) - вапняк;

б) - гнейс; в) – граніт

Фото точок на зразку граніта, для яких проведено хімічний аналіз: +1 – точка №1; +2 – точка № 2, представлено на рис. 4.3

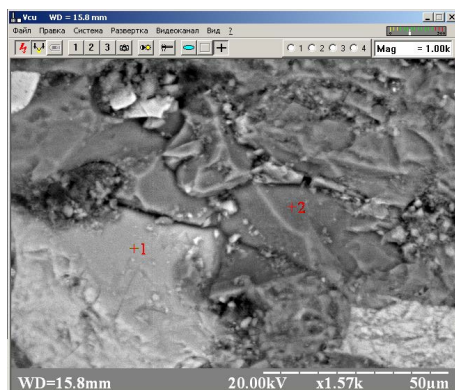


Рисунок 4.3 - Фото точок на зразку граніту в яких проведено хімічний аналіз: +1 – точка №1; +2 – точка № 2

Результати програмної обробки даних хімічного аналізу зразку граніту: а) - у точці № 1, б) - у точці № 2, зображені на рис. 4.4

а)

Елемент	Инт.	Погр.%	С %	С-Риt %	ZAF	ZAF-Риt	Валент.	Атом.%	Коеф.	Текст
Mg	K	82	19.68	2.59	60.31	1.2867	0.6675	2	0.000	0.000
Al	K	654	5.78	12.01	99.90	1.1743	1.0003	3	0.000	0.000
Si	K	1360	3.98	26.73	99.99	0.9367	1.0000	4	0.000	0.000
K	K	1230	5.05	0.00	0.00	0.0000	0.0000	1	0.000	0.000
Ca	K	96	24.45	1.44	51.33	0.9283	0.9304	2	0.000	0.000
Ca	L	0	1157.42	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000
Ti	K	215	13.14	4.03	99.90	0.9273	1.0000	4	0.000	0.000
Ti	L	-1	791.58	0.00	0.00	0.0000	0.0000	4	0.000	0.000
Fe	K	1686	2.60	53.20	99.90	0.8828	1.0000	2	0.000	0.000
Fe	L	-1	720.78	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000

б)

Елемент	Инт.	Погр.%	С %	С-Риt %	ZAF	ZAF-Риt	Валент.	Атом.%	Коеф.	Текст
Mg	K	25	61.66	0.97	60.31	0.9486	0.6675	2	0.000	0.000
Al	K	948	6.84	18.83	99.90	0.9843	1.0003	3	0.000	0.000
Si	K	2954	3.75	68.31	99.99	0.7217	1.0000	4	0.000	0.000
Ca	K	505	4.27	9.10	51.33	0.6398	0.9304	2	0.000	0.000
Ca	L	1	899.27	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000
Fe	K	86	8.31	2.79	99.90	0.7785	1.0000	2	0.000	0.000
Fe	L	0	62819.86	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000

Рисунок 4.4 - Результати програмної обробки даних хімічного аналізу зразку граніту: а) - у точці № 1, б) - у точці № 2

Польовий шпат у даному зразку граніту представлений сульфідним сірчано-ферумним з'єднанням гідротермального походження. Має досконалу

спайність по двом напрямкам за індексами Міллера [001] та [010]. Для нього характерне кубічне та гексагональне упакування іонів сірки, між якими розміщені іони феруму. Досить поширений у природі – 0.15 % маси усієї земної кори. Температура плавлення знаходиться у межах (973...1473) К, щільність (4800...4900) кг/м<sup>3</sup> [98, 100]. Слюда даного граніту має дуже досконалу спайність. На основі хімічного аналізу, за попередніми припущеннями, відноситься до групи магнезійно-залізистих слюд і представлена мінералом біотитом. Розщеплення проходить по площині спайності з індексом Міллера [001]. Щільність (2800...3400) кг/м<sup>3</sup>. [101].

Другий зразок - метаморфічна сланцева ГП – гнейс. В Україні використовується, в основному, для виробництва щебеню, бута, облицювального каменю, мощення доріг. За складом близький до граніту, рис.4.5, тобто, складений з кварцу, польового шпату, кольорових мінералів (біотиту, авгіту, рогової обманки, піроксена тощо) [102].

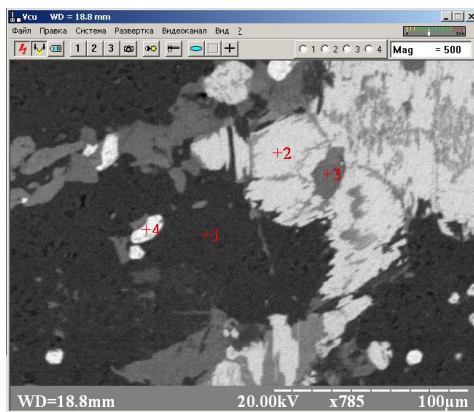


Рисунок 4.5 - Фото точок на зразку гнейсу, в яких проведено хімічний аналіз: +1 – точка №1; +2 – точка № 2; +3 – точка № 3; +4 – точка № 4

За результатами хімічного аналізу, рис 4.6, даний зразок гнейсу на 66 % складається з кремнію, 15 % сірки та 15 % заліза, решта домішок – кальцій та алюміній. Складається з мінералів кварцу, слюди та польового шпату, рис 4.6.

а)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00										
Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Пур %	ZAF	ZAF-Пур	Валент.	Атом. %	Кэф.	Текст
Al	K	20	78.27	0.88	99.90	1.0407	1.0003	3	0.000	0.000
Si	K	2257	4.45	85.93	99.99	1.0227	1.0000	4	0.000	0.000
S	K	71	32.08	6.34	13.74	0.3935	0.6165	6	0.000	0.000
Ca	K	36	17.80	1.57	51.33	0.6732	0.9304	2	0.000	0.000
Ca	L	0	173.94	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000
Fe	K	70	9.48	5.28	99.90	0.7803	1.0000	2	0.000	0.000
Fe	L	0	92.95	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000

б)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00										
Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Пур %	ZAF	ZAF-Пур	Валент.	Атом. %	Кэф.	Текст
Al	K	4	267.69	0.04	99.90	1.6652	1.0003	3	0.000	0.000
Si	K	293	11.44	2.37	99.99	1.7238	1.0000	4	0.000	0.000
S	K	3828	2.85	47.80	13.74	1.0420	0.6165	6	0.000	0.000
Ca	K	8	106.45	0.11	51.33	0.8067	0.9304	2	0.000	0.000
Ca	L	1	234.62	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000
Fe	K	1976	3.64	49.68	99.90	0.8677	1.0000	2	0.000	0.000
Fe	L	3	87.31	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000

в)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00										
Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Пур %	ZAF	ZAF-Пур	Валент.	Атом. %	Кэф.	Текст
Mg	K	104	14.84	5.64	60.31	1.2465	0.6675	2	0.000	0.000
Al	K	150	12.17	5.07	99.90	1.0587	1.0003	3	0.000	0.000
Si	K	1026	4.03	31.31	99.99	1.0012	1.0000	4	0.000	0.000
S	K	137	13.24	5.92	13.74	0.6377	0.6165	6	0.000	0.000
Ca	K	524	4.58	14.15	51.33	0.8548	0.9304	2	0.000	0.000
Ca	L	0	236.57	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000
Fe	K	690	3.94	37.90	99.90	0.8416	1.0000	2	0.000	0.000
Fe	L	0	514.50	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000

г)

Информация										
Напряжение (кВ): 20.00										
Сумма %: 100.00										
Элемент	Инт.	Погр. %	С %	С-Пур %	ZAF	ZAF-Пур	Валент.	Атом. %	Кэф.	Текст
Mg	K	2	372.69	0.05	60.31	1.6567	0.6675	2	0.000	0.000
Al	K	17	65.33	0.22	99.90	1.5823	1.0003	3	0.000	0.000
Si	K	330	7.87	3.62	99.99	1.5628	1.0000	4	0.000	0.000
S	K	2205	2.79	32.66	13.74	1.0436	0.6165	6	0.000	0.000
Ca	K	37	24.15	0.53	51.33	0.8960	0.9304	2	0.000	0.000
Ca	L	-1	107.09	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000
Fe	K	2184	2.98	62.93	99.90	0.8994	1.0000	2	0.000	0.000
Fe	L	-1	114.64	0.00	0.00	0.0000	0.0000	2	0.000	0.000

Рисунок 4.6 - Результаты программной обработки данных химического анализа  
 зразку гнейсу: а)- у точці №1, б)- у точці №2, в) - у точці №3, г) - у точці - №4

Ще один зразок – вапняк. Його поклади зустрічаються у всіх геологічних системах — від докембрійських до четвертинних. Масова частка серед осадових ГП складає в середньому (19...22) % [103]. Балансові запаси вапняку в Україні становлять близько 2.5 млрд. т [96]. З результатів хімічного аналізу, рис. 4.2, вапняк складається на 90 % з кальцію, решту складають домішки сірки, фосфору, алюмінію та кремнію. Підвищений вміст кальцію у зразку визначає досконалу спайність, що супроводжується раковидним зломом під час руйнування.

Останній зразок – пісковик. Входить до групи облицювальних каменів. Запаси в Україні – близько 150 млн. т. Видобуток - 2500 тис. т в рік [104].

Усі (окрім вапняку) обрані види ГП для дослідження є полімінеральними і мають різні деформаційні та міцнісні характеристики у залежності від хімічного та відсоткового складу, як видно з табл. 4.1.

#### **4.2 Стенд для встановлення залежності питомої поверхневої енергії від дії магніто- гідродинамічного кавітаційного навантаження**

Експериментальний стенд для дослідження зміни ППЕ під дією МГК навантаження представлений на рис. 4.7. Розроблений за схемою представленою на рис. 2.1.

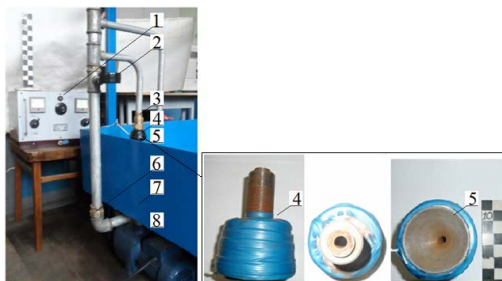


Рисунок 4.7 - Схема експериментального стенду по дослідженню зміни питомої поверхневої енергії гірських порід під час їх обробки магніто-



гідродинамічним кавітаційним навантаженням: 1 - випрямляч ВСА-5К; 2 – манометр ДМ 05063; 3 – муфта; 4 – кавітатор; 5 – обмотка індуктивності постійного струму; 6 - трубопровід; 7 – резервуар; 8 - відцентровий насос JEX 500

Ослаблення ГП та, як наслідок, зниження модуля пружності I роду і ППЕ, відбувається за рахунок дії кавітаційного потоку. Останній утворюється у кавітаторі 4 (рис. 4.7) під час проходженні рідини через промивний канал з дифузоров. Фото кавітаторів представлено на рис. 4.8.



Рисунок 4.8 – Кавітатори: а - №1; б - №2; в - №3

На рис. 4.8 а на кавітаторі № 1 розміщена обмотка, яка забезпечує фокусування кавітаційного потоку. Під час під'єднання її до мережі постійного струму у кавітаторі виникає постійне магнітне поле. Домішки води (газові бульбашки, зважені та іонізовані частинки, включення інших рідин тощо),

навколо яких утворюються кавітаційні каверни [105], рухаються у магнітному полі зі швидкістю  $\vec{U}$ , м/с.

Геометричні параметри кавітаторів занесені у табл. 4.2

Таблиця 4.2 - Геометричні параметри кавітаторів

Номер кавітатора	Довжина кавітатора $l_k$ , мм	Діаметр критичного перерізу кавітатора $D1$ , мм	Діаметр виходу кавітатора $D3$ , мм	Кут розкриття $\beta$ , градус
1	2	3	4	5
№ 1	10	9	20	60
№ 2	30	9	45	60
№ 3	50	9	70	60

Вектор ліній магнітної індукції  $\vec{B}$ , Тл співпадає з напрямком руху рідини у кавітаторі.  $\vec{U}$  розкладається на дві складові: паралельну магнітному полю  $u_{||}$  та перпендикулярну  $u_{\perp}$ . За першою складовою домішки з кавітаційними бульбашками рухаються поступально вздовж  $\vec{B}$ . За другою складовою вони рухаються з гвинтоподібним характером (прецесують) за ларморовим колом [105]. Обмотка виконана так, що  $\vec{B}$  зростає у напрямку виходу кавітатора у межах (10...50) мТл. Домішки разом з кавітаційними бульбашками фокусуються навколо ліній магнітної індукції. Це відбувається, завдяки дії сили Лоренца, що лежить у площині перпендикулярній  $\vec{B}$ . При цьому, згідно (3.17) частота прецесії кавітаційного потоку за ларморовим колом сягає радіодіапазону (0.1...1) ГГц. Це створює субрезонансне частотне навантаження до власної частоти коливань кристалічної структури ГП.

#### 4.3 Умови виникнення кавітації

Необхідними умовами для виникнення режиму кавітації є [83, 106]:

- наявність центрів пароутворення у промивній рідині;

- досягнення промивною рідиною температури або тиску насиченої пари.

За першою умовою, центрами пароутворення є домішки різного характеру, наприклад: іони заліза, кальцію, магнію, газові бульбашки тощо [107]. Вони завжди присутні у промивній рідині (буровому розчині).

Друга умова виконується при проходженні промивної рідини через місцеве звуження, яким є промивний канал бурової установки. При цьому відбувається зростання швидкості потоку, що супроводжується зниженням тиску рідини до стану насичення. Значення температури промивної рідини в умовах експерименту 293 К. Тиск насиченої пари, що відповідає даній температурі -0.023 МПа [106]. Це означає, що тиск на виході промивного каналу повинен бути не вище 0.023 МПа. Нижче наведено перевірку виконання поставлених умов досягнення кавітаційного режиму. Для характеристики режиму кавітації обрано безрозмірний параметр – число кавітації  $\tau$  (3.39), в. о. Згідно [107, 108], початок кавітаційного режиму характеризується критичним числом кавітації  $\tau_{кр}$ , в. о. Необхідною умовою перебігу кавітаційного процесу є  $\tau \leq \tau_{кр}$ .

Урахування впливу кута розкриття та довжини дифузору кавітатора відбувається через число кавітації, що характеризує відношення абсолютного тиску насиченої пари до тиску на вході і виході з дифузору [107], в. о.

$$\tau_{кр} = \frac{2 \cdot \left( P_1 - P_{кр} \right)}{\rho \cdot v_1^2}, \quad (4.1)$$

де  $P_1$  та  $v_1$  – абсолютний тиск та швидкість у незбуреному потоці (перед кавітатором), відповідно, Па та м/с;

$P_{нп}$  – тиск насиченої пари при даній температурі, Па;

$\rho$  – густина промивної рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$P_{кр}$  – абсолютний тиск у місцевому звуженні (промивному каналі кавітатора), Па.

Абсолютний тиск у трубопроводі перед кавітатором  $P_I$  вимірювався за показами манометра ДМ 05063 (рис. 4.7). Швидкість потоку  $v_{ср1}$  визначалась з урахуванням паспортних даних насоса JEX 500 (рис. 4.7) та геометричних параметрів трубопроводу експериментального стенду. Абсолютний тиск у промивному каналі кавітатора  $P_{кр}$  визначався з урахуванням  $P_I$  та  $v_I$  за допомогою комп'ютерного модулю Solid Works (*Product: SolidWorks EDU Edition 2009-2010-NETWORK, Serial Number 9713048193256. Account Name: Kyiv Politechnic Institute*). Перевагою використання Solid Works є можливість дослідження зміни тиску та швидкості не у одній конкретній точці промивного каналу, а по всій довжині кавітатора, рис. 4.9.

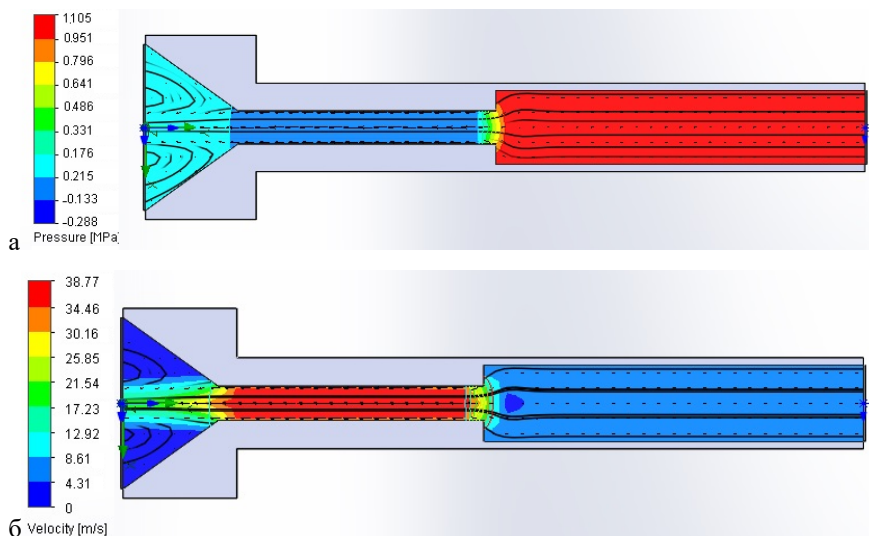


Рисунок 4.9 - Віртуальне зображення розрізу кавітатора з вказанням: а - перепаду тисків; б - швидкості промивної рідини

На рис. 4.9 а та 4.9 б рівень тиску та швидкості представлені відповідним кольором на легенді, з якої визначається значення в МПа або м/с, відповідно. З цього отримано, що  $P_I=0.10$  МПа,  $P_{кр}= 0.02$ МПа,  $v_I=14$  м/с.

Таким чином, з (3.39) та (4.1) визначено, що  $\tau=0,786$ , а  $\tau_{кр}=0,801$ . Тобто, досягнуто кавітаційного режиму згідно умови представленої вище.

#### 4.4 Вплив магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження на модуль пружності I роду гірських порід

Досліджено модуль пружності першого роду  $E$  (надалі модуль пружності) кожного з зразків до і після експерименту. Для цього використано пристрій «Мікрон Гамма», який дозволяє на основі діаграм навантаження отримувати значення  $E$ . Обґрунтування вибору пристрою та основні характеристики наведені у розділі 2.

Діаграми навантаження зразків обраних видів ГП та результати їх програмної обробки представлені на рис. 4.10, та рис. 4.11.

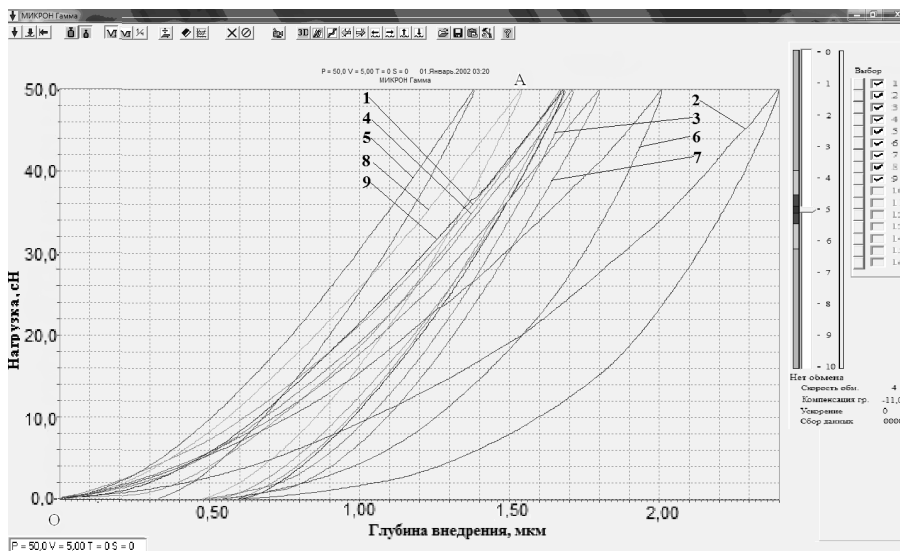


Рисунок 4.10 - Діаграми навантаження граніту індентором Берковича

Умовні позначення на рисунках наступні: № - порядковий номер вдавлювання;  $P$  - навантаження, г;  $T$  - час втримання зразку під

навантаженням, с;  $h_1$  – глибина занурення індентора при максимальному навантаженні, мкм;  $h_2$  – глибина занурення після зняття навантаження, мкм;  $h_c$  – мкм;  $H$  (Мартел) – твердість по Мартелу, МПа;  $H$  (Мейер) – твердість по Мейеру, МПа;  $E$  – модуль пружності, ГПа;  $A_{об}$  – робота витрачена на подолання опору матеріалу, Дж;  $A_{уп}$  – робота пружно-пластичних деформацій, Дж;  $s_{(пласт)}$  – коефіцієнт пластичності, в. о.;  $K_{пласт}$  – коефіцієнт пластичності матеріалу, в.о.;  $D$  – максимальне відхилення значень вище перелічених фізичних величин у дійсних одиницях;  $M$  – середньостатистичне значення вище перелічених фізичних величин у дійсних одиницях, “%” - похибка, %.

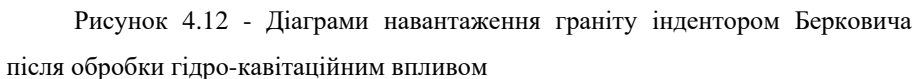
Таблица расчетов										
P = 50,0 V = 5,00										
N°	h1_mkm	h2_mkm	H(Мартел)	H(Мейер)	H(Мейер)	E,ГПа	Aоб	Aуп	s (пласт)	K пласт
1	1,667	0,589	7,491	7,347	16,115	105,8	28,33	21,56	0,239	0,522
2	2,395	0,609	3,560	3,558	5,471	72,0	39,95	24,34	0,391	0,710
3	1,711	0,480	7,553	6,975	14,232	104,9	30,89	21,44	0,306	0,585
4	1,683	0,501	8,295	7,201	15,068	106,6	32,33	22,66	0,299	0,598
5	1,379	0,324	12,507	10,731	26,604	146,2	26,80	21,44	0,200	0,531
6	1,678	0,594	8,143	7,251	14,796	109,1	31,42	21,15	0,327	0,600
7	1,797	0,545	6,982	6,317	13,140	93,8	33,13	21,80	0,342	0,584
8	1,536	0,472	10,116	8,647	19,369	123,2	29,97	21,11	0,296	0,575
9	2,005	0,540	5,713	5,075	8,476	91,6	37,64	22,86	0,393	0,699
D	0,276	0,083	2,381	1,911	5,697	19,537	3,971	1,001	0,060	0,061
M	1,761	0,517	7,818	7,011	14,808	105,911	32,273	22,040	0,310	0,600
%	15,7	16,0	30,5	27,3	38,5	18,4	12,3	4,5	19,3	10,2

Отступ % 10 dP % 10
Расчет
Печать
Форма
Редактор

Рисунок 4.11 - Результати програмної обробки діаграм навантаження граніту індентором Берковича

Діаграма навантаження граніту складається з двох характерних ділянок: кривої навантаження (ОА) та кривої розвантаження (АО). На діаграмі відображається робота, витрачена індентором на подолання опору матеріалу  $A_{об}$  - площа над гілкою навантаження, рис. 4.10. А також робота пружних сил виконана матеріалом на відновлення форми  $A_{уп}$  після вдавлювання – площа під

Модуль пружності для граніту визначається з результатів програмного аналізу, рис. 4.11, 9-ти діаграм навантаження, рис. 4.10. Кожна діаграма навантаження відповідає уколу індентора. Кінцеве значення модуля пружності для усього зразка визначалось як середньостатистичне з 9-ти результатів і становить – 105,91 ГПа. Дисперсія значень складає 18.4 %. Дослідження модуля пружності I роду для граніту після МГК навантаження представлений на рис 4.12 -4.15.



87

Таблица расчетов

P = 50.0 V = 5.00 T = 0 S = 0 13 Февраль 2015 20:14

N°	P, гр	V, гр/с	T, с	H1, мм	H2, мм	N1, мм	H1(Мойер)	H2(Мойер)	H(Мойер)	E, ГПа	Aсб	Aст	z (пласт)	K, пласт	Напр. ГПа
1	50.0	5.0	0	1,930	1,952	1,012	5,754	5,477	8,475	109,7	33,81	16,63	0,508	0,720	1,449
2	50.0	5.0	0	1,676	1,145	0,541	8,374	7,265	15,574	106,0	32,21	22,18	0,312	0,588	1,922
3	50.0	5.0	0	2,058	1,536	0,726	5,394	4,819	8,646	80,4	38,40	22,51	0,414	0,680	1,275
4	50.0	5.0	0	2,230	1,919	1,099	5,101	4,104	5,544	107,9	46,22	16,65	0,640	0,832	1,086
5	50.0	5.0	0	1,561	1,026	0,539	10,454	8,371	19,377	117,4	32,51	21,44	0,340	0,589	2,215
6	50.0	5.0	0	1,854	1,299	0,679	6,538	5,934	12,091	89,3	34,07	22,48	0,340	0,592	1,570
7	50.0	5.0	0	3,296	2,980	2,078	1,974	1,879	2,299	68,5	57,72	16,55	0,713	0,863	0,497
8	50.0	5.0	0	1,683	1,141	0,617	8,530	7,209	15,679	104,3	33,19	21,34	0,357	0,592	1,908
9	50.0	5.0	0	1,843	1,517	0,867	7,350	6,009	8,868	130,3	37,59	14,95	0,602	0,783	1,590
10	50.0	5.0	0	1,788	1,320	0,671	7,638	6,387	11,721	104,4	35,64	20,36	0,429	0,672	1,690
D				0,472	0,539	0,437	2,215	1,745	4,861	17,056	7,629	2,807	0,136	0,100	
M				1,932	1,544	0,883	6,711	5,745	10,827	101,820	38,136	19,509	0,466	0,689	

Отступ % 10 dP % 10 Расчет Закрыть Печать Форма Редактор

Рисунок 4.13 - Результати програмної обробки діаграм навантаження граніту після обробки гідро-кавітаційним навантаженням

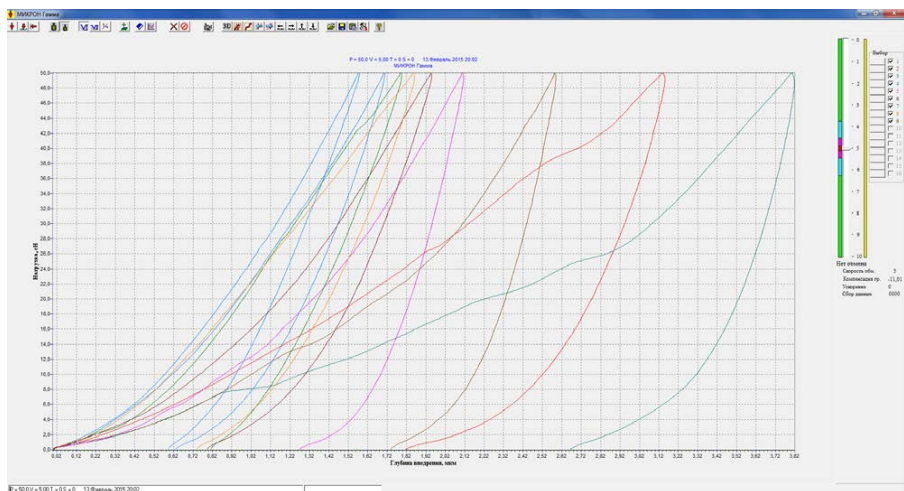


Рисунок 4.14 - Діаграми навантаження граніту індентором Берковича після обробки магніто-гідродинамічним кавітаційним впливом





Для інших обраних видів зразків ГП модуль пружності визначався аналогічно. З аналізу діаграми навантаження гнейсу та результатів її програмної обробки, рис. 4.16, рис. 4.17, визначено, що модуль пружності – 145.62 ГПа.

Таблица расчетов														
P = 50.0 V = 5.00 T = 0 S = 0 01.Январь, 2002 03:31														
№	P, гр.	V, гр/с	T, с	h1, мкм	hс, мкм	h2, мкм	H(Marpen)	H(Meier)	H(Meier)	E, GPa	Aоб	Aпл	z (пласт)	K, пласт
1	50.0	5.0	0	1,120	0,830	0,503	23,283	16,256	29,602	267.6	26.76	13.24	0.505	0.729
2	50.0	5.0	0	1,562	1,269	0,881	9,961	8,362	12,682	173.0	31.03	21.27	0.315	0.763
3	50.0	5.0	0	1,517	1,246	0,945	10,227	8,866	13,140	190.9	29.18	13.09	0.552	0.768
4	50.0	5.0	0	1,477	1,168	0,852	11,792	9,361	14,950	179.0	31.01	14.14	0.544	0.752
5	50.0	5.0	0	1,831	1,394	0,728	6,834	6,086	10,498	105.8	34.29	19.74	0.424	0.681
6	50.0	5.0	0	1,831	1,358	0,791	7,048	6,086	11,069	100.3	35.36	20.01	0.434	0.665
7	50.0	5.0	0	2,843	2,533	1,185	2,860	2,525	3,180	82.2	53.70	21.26	0.604	0.856
8	50.0	5.0	0	1,969	1,604	1,131	4,660	5,262	7,936	109.9	29.08	15.75	0.458	0.686
9	50.0	5.0	0	1,806	1,331	0,619	6,883	6,257	11,522	101.9	33.12	21.23	0.359	0.641
				0,449	0,441	0,209	5,608	3,617	6,775	57,390	7,511	3,415	0,089	0,063
M				1,773	1,415	0,848	9,283	7,673	12,731	145,622	33,726	17,748	0,466	0,727
%				25.3	31.2	24.7	60.4	47.1	53.2	39.4	22.3	19.2	19.1	8.6
Отступ % 10				dP % 10				Расчет						
								Закреть Печать Форма Редактор						

Рисунок 4.17 - Результати програмної обробки діаграм навантаження гнейсу

Дисперсія значень складає 39.4 %. Викликана полімінеральністю та дрібнозернистістю ГП. Відстань між сусідніми точками вдавлювання індентора займає 10 мкм. Це достатня відстань для переходу від зернових включень кварцу до слюди та польового шпату. Останні мають різні фізико-механічні властивості і, як наслідок, модуль пружності.

З аналізу діаграми навантаження вапняку та результатів її програмної обробки, рис. 4.18, рис. 4.19, визначено, що модуль пружності та дисперсія значень – 51.84 ГПа та 9.3 %, відповідно.

Несуттєве розсіювання значень обумовлено тим, що за хімічним складом вапняк, практично, мономінеральний. Частка кальцію – більше 90 %. Цим обумовлена однорідність модуля пружності у різних точках вдавлювання індентора.

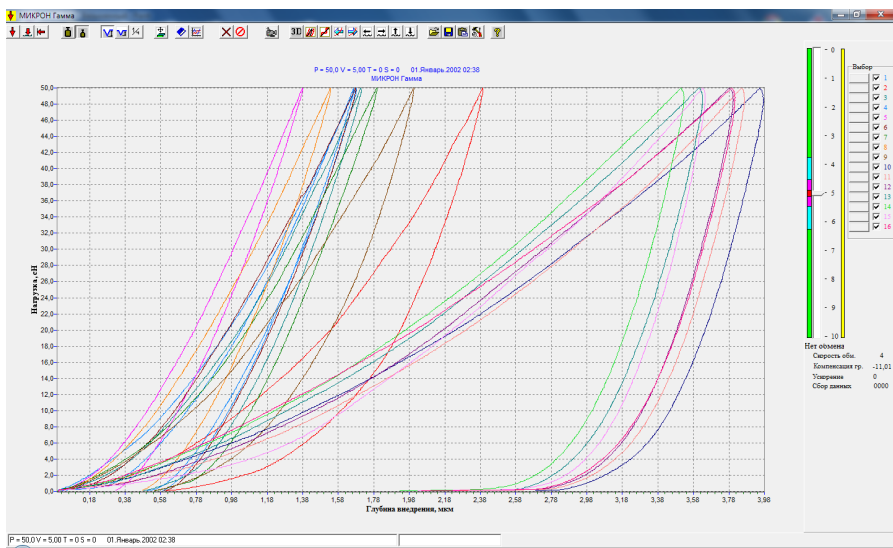


Рисунок 4.18 - Діаграми навантаження вапняку індентором Берковича

Таблица расчетов															
P = 50.0 V = 5.00 T = 0 S = 0 01.Январь.2002 02:44															
№	P, гр.	V, гр/с	T, с	h1, мкм	hс, мкм	h2, мкм	H(Margre)	H(Мейер)	H(Мейер)	E, ГПа	Арб	Асп	z (пласт)	K, пласт	Нагр. GF
1	50.0	5.0	0	3.976	3.604	2.687	1.491	1.291	1.571	48.2	76.52	20.89	0.727	0.879	0.342
2	50.0	5.0	0	3.867	3.510	2.098	1.477	1.365	1.656	51.4	69.79	17.57	0.748	0.872	0.361
3	50.0	5.0	0	3.804	3.458	2.025	1.601	1.411	1.707	53.9	71.96	18.50	0.743	0.880	0.373
4	50.0	5.0	0	3.631	3.276	2.010	1.792	1.548	1.902	55.4	70.05	17.69	0.747	0.873	0.410
5	50.0	5.0	0	3.525	3.167	1.924	1.924	1.642	2.035	56.8	68.85	17.16	0.751	0.870	0.435
6	50.0	5.0	0	3.645	3.343	2.024	1.576	1.536	1.826	63.9	62.35	16.02	0.743	0.879	0.406
7	50.0	5.0	0	3.814	3.456	2.043	1.719	1.403	1.709	52.0	77.95	18.10	0.768	0.885	0.371
8	50.0	5.0	0	4.054	3.719	1.884	1.311	1.242	1.475	51.8	71.37	17.75	0.751	0.883	0.329
9	50.0	5.0	0	4.175	3.799	2.089	1.214	1.171	1.414	45.1	72.18	17.27	0.761	0.870	0.310
10	50.0	5.0	0	3.800	3.466	2.020	1.607	1.413	1.699	55.6	72.06	17.60	0.756	0.884	0.374
11	50.0	5.0	0	3.952	3.564	2.086	1.531	1.306	1.607	46.5	77.21	18.18	0.765	0.874	0.346
12	50.0	5.0	0	4.526	4.175	2.137	1.063	0.996	1.171	44.0	80.52	18.30	0.773	0.891	0.264
13	50.0	5.0	0	3.859	3.515	2.044	1.525	1.370	1.652	53.3	71.60	17.69	0.753	0.880	0.363
14	50.0	5.0	0	3.833	3.465	2.058	1.561	1.389	1.700	50.6	71.82	17.70	0.754	0.872	0.368
15	50.0	5.0	0	4.404	4.075	2.202	0.997	1.052	1.229	48.0	69.58	16.89	0.757	0.882	0.278
16	50.0	5.0	0	3.731	3.370	2.111	1.710	1.466	1.797	52.9	72.56	16.91	0.767	0.875	0.388
D				0.261	0.261	0.171	0.244	0.167	0.220	4.806	4.130	1.003	0.011	0.006	
M				3.912	3.560	2.090	1.506	1.350	1.634	51.837	72.273	17.764	0.754	0.878	
%				6.7	7.3	8.2	16.2	12.4	13.5	9.3	5.7	5.6	1.5	0.7	
Отступ % 10				dP % 10				Расчет		Закрыть		Печать		Форма	
														Редактор	

Рисунок 4.19 - Результати програмної обробки діаграм навантаження вапняку

З аналізу діаграми навантаження пісковику та результатів її програмної обробки, рис 4.20 та рис 4.21, визначено, що модуль пружності – 31.91 ГПа. Хвилястість кривої навантаження викликана структурою самого пісковику – дрібнозернистою польовошпаткварцевою. Включення польового шпату є більш слабким матеріалом за механічними характеристиками, ніж кварцовий пісок. Це підтверджено результатами обробки даних представленими на рис 4.2 та рис 4.21. Кварц є основною складовою ГП, частка якого займає 80 % [110]. Під час навантаження польовий шпат стискається та ущільнюється. Зерна кварцу за таких умов починають «просідати». На діаграмі навантаження це відповідає ділянкам «западання». Значне розсіяння даних модуля пружності в 47.9 % обумовлене тим, що точки вдавлювання індентора виконані як на кварці (відповідає значенням наближеним до максимуму, рис 4.20, рис 4.21, так і на польовому шпаті (відповідає значенням наближеним до мінімуму, рис 4.20 та рис 4.21), які мають різні міцнісні характеристики.

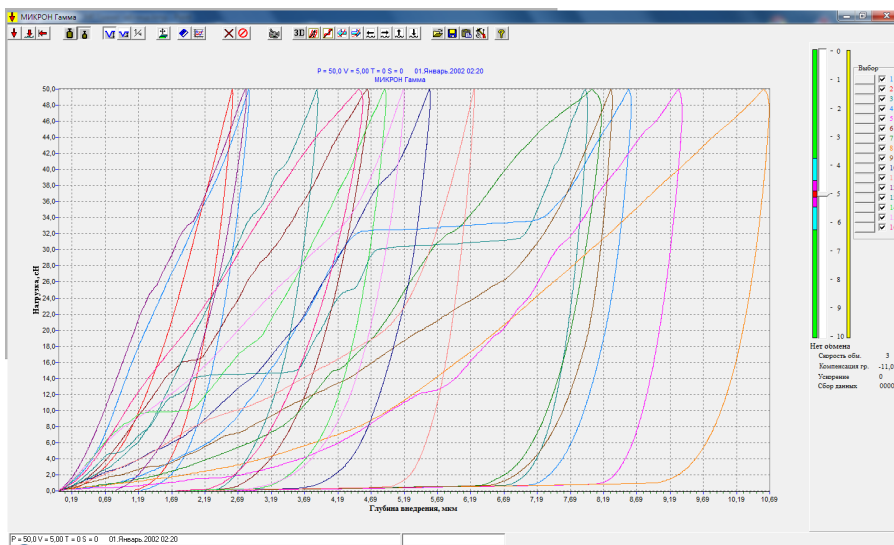


Рисунок 4.20 - Діаграми навантаження пісковику індентором Берковича

Таблица расчетов

Рисунок 4.21 - Результати програмної обробки діаграм навантаження пісковику

Після обробки зразків ГП МГК навантаженням отримано діаграму та результати її програмної обробки для вапняку, рис 4.22 та рис 4.23.

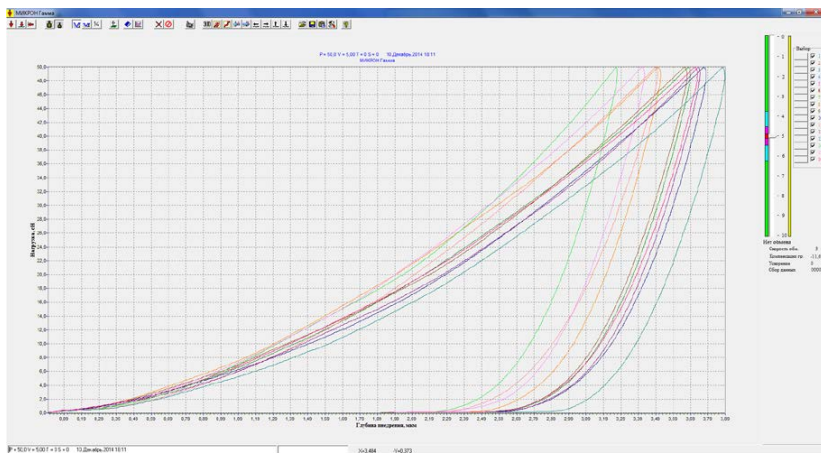


Рисунок 4.22 - Діаграми навантаження вапняку індексом Берковича після магніто – гідродинамічної кавітаційної обробки

Таблица расчетов														
P = 50.0 V = 5.00 T = 0.5 = 0 10.Декабрь.2014 18:11														
№	P, гр.	V, гр/с	T, с	h1, мкм	hс, мкм	h2, мкм	H(Magrel)	H(Mesier)	H(Mesier)	E, GPa	Δσ <sub>0</sub>	Δσ <sub>п</sub>	s (пласт)	K пласт.
1	50.0	5.0	0	3.502	3.101	2.144	1.773	1.664	2.122	51.9	62.22	19.68	0.684	0.839
2	50.0	5.0	0	3.744	3.350	2.279	1.959	1.456	1.819	48.8	66.82	17.35	0.740	0.852
3	50.0	5.0	0	3.887	3.511	2.248	1.425	1.351	1.656	48.8	68.37	16.52	0.758	0.863
4	50.0	5.0	0	3.269	2.933	2.002	1.975	1.910	2.372	65.4	56.39	15.96	0.717	0.851
5	50.0	5.0	0	3.425	3.066	1.955	1.927	1.740	2.171	58.6	63.24	16.52	0.739	0.858
6	50.0	5.0	0	3.728	3.353	2.060	1.641	1.468	1.815	51.3	69.49	18.78	0.730	0.865
7	50.0	5.0	0	3.688	3.323	2.132	1.655	1.500	1.848	53.1	67.86	17.64	0.740	0.865
8	50.0	5.0	0	3.519	3.160	1.982	1.870	1.648	2.044	56.9	66.56	16.77	0.748	0.865
9	50.0	5.0	0	3.668	3.306	1.906	1.668	1.517	1.867	53.9	67.26	16.87	0.749	0.865
10	50.0	5.0	0	3.779	3.412	2.069	1.547	1.429	1.753	51.5	68.18	17.74	0.740	0.866
11	50.0	5.0	0	3.502	3.101	2.144	1.773	1.664	2.122	51.9	62.22	19.68	0.684	0.839
12	50.0	5.0	0	3.744	3.350	2.279	1.959	1.456	1.819	48.8	66.82	17.35	0.740	0.852
13	50.0	5.0	0	3.887	3.511	2.248	1.425	1.351	1.656	48.8	68.37	16.52	0.758	0.863
14	50.0	5.0	0	3.269	2.933	2.002	1.975	1.910	2.372	65.4	56.39	15.96	0.717	0.851
15	50.0	5.0	0	3.425	3.066	1.955	1.927	1.740	2.171	58.6	63.24	16.52	0.739	0.858
16	50.0	5.0	0	3.728	3.353	2.060	1.641	1.468	1.815	51.3	69.49	18.78	0.730	0.865
D				0.192	0.182	0.120	0.180	0.173	0.226	5.299	4.069	1.181	0.021	0.009
M				3.610	3.239	2.092	1.709	1.580	1.964	54.062	65.182	17.415	0.732	0.857
Отступ % 10 dP % 10				Расчет				Закрытие				Печать		
								Форма				Редактор		

Рисунок 4.23 - Результати програмної обробки діаграма навантаження вапняку після магніто-гідродинамічної кавітаційної обробки

З аналізу даних визначено, що модуль пружності для вапняку зріс з 51.84 ГПа до 54.06 ГПа. Це пов'язано з тим, що зі збільшенні навантаження скорочується пористість. Тобто, під час ущільнення між елементарними частинками ГП поновлюються раніше втрачені адгезійні зв'язки та з'являються новоутворені. Також, з насиченням скельних ГП водою зростають їх пружні властивості [111], що підтверджено результатами експерименту. Зростання модулю пружності викликане формуванням ядра ущільнення, що супроводжується переходом у зону крихкого руйнування. Це підтверджено дослідженнями щільності зразку до та після МГК навантаження за допомогою пристрою УИСУ-01, рис. 4.24 [112].

Робота пристрою базується на тому, що, чим більша щільність матеріалу, тим більша швидкість проходження звукової хвилі крізь нього. Для даного зразку вапняку (табл. 4.1) до МГК навантаження швидкість звукової хвилі складала 4951 м/с, після – 5128 м/с, тобто на 3.5 % більше. Відомо, що ГП з мінімальною зоною пластичності (як правило, ті що мають упорядковану кристалічну структуру наприклад вапняки, граніти тощо) потребують меншої

кількості енергії для руйнування, ніж ті, що мають високу пластичність (наприклад глини) [113]. Це пов'язано з наявністю кристалічної структури в ГП, що руйнуються за пружно-крихким характером (наприклад скельні ГП) та відсутністю її в ГВ, що руйнуються за пружно-пластичним характером (наприклад глинисті ГП). У кристалічній структурі елементарні частинки мають радіус молекулярної дії.

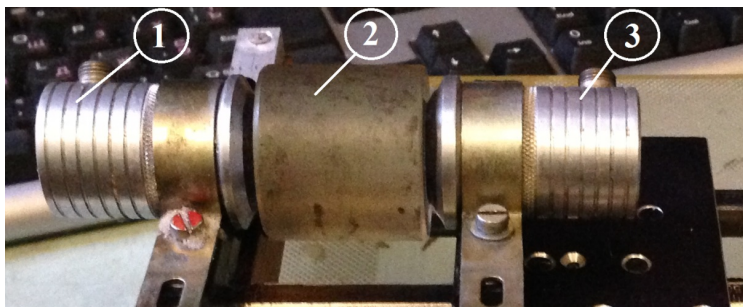


Рисунок 4.24 - Пристрій для виміру швидкості ультразвукових хвиль УИСУ-01 (1 – випромінювач, 2 – зразок, 3 – приймач)

Під час прикладення навантаження відбувається ущільнення, що супроводжується скороченням радіусу молекулярної дії та зростанням сил відштовхування. З досягненням критичного значення навантаження, елементарні частинки відштовхуються одна від одної і виникає розрив зв'язку на мікрорівні та утворення тріщини на макрорівні. У пластичних ГП цей механізм не діє через відсутність упорядкованої енергетичної взаємодії між елементарними частинками. Частина енергії руйнування іде на утворення залишкової деформації.

Після обробки зразків пісковику МГК навантаженням повторно отримано діаграму навантаження та результати її програмної обробки, рис. 4.25 та рис 4.26.

Діаграми навантаження пісковику № 3, № 4 та № 5 мають хвилеподібний характер. Це пов'язано з тим, що після МГК обробки частина слабких фракцій

The screenshot displays the MIPROCH 1.0 software interface. The main window shows a graph of external pressure (Наружное, ат) on the y-axis (0.0 to 50.0) versus depth (Глубина погружения, м) on the x-axis (0.00 to 10.50). The graph contains several curves representing different depths, color-coded from blue (shallow) to red (deep). A vertical color bar on the right indicates depth in meters (Глубина, м) from 0 to 10. The software title bar shows 'MIPROCH 1.0' and the status bar shows '03.08.2015 16:33'.

№	P, рр	V, рр/с	T, с	n1, н/м	n2, н/м	H1, мм	H2, мм	H3, мм	H4, мм	E, ГПа	Δσ <sub>б</sub>	Δσ <sub>г</sub>	ε (пласт.)	K, пласт.	Нарр, ГПа
1	50.0	5.0	0	3.069	2.402	0.720	2.752	2.168	3.538	40.2	64.36	36.55	0.437	0.743	0.574
2	50.0	5.0	0	5.788	5.192	0.378	0.753	0.609	0.757	20.8	119.33	86.72	0.273	0.675	0.161
3	50.0	5.0	0	5.583	5.114	2.326	0.864	0.655	0.780	26.3	122.76	53.04	0.568	0.904	0.173
4	50.0	5.0	0	3.837	3.439	2.073	1.926	1.386	1.725	47.1	88.89	26.88	0.698	0.888	0.367
5	50.0	5.0	0	4.907	4.577	2.335	1.107	0.848	0.954	42.7	106.82	34.73	0.673	0.923	0.224
6	50.0	5.0	0	10.223	9.305	0.130	0.194	0.195	0.208	20.4	169.41	23.09	0.864	0.953	0.052
7	50.0	5.0	0	4.928	4.470	2.607	1.326	0.841	1.021	31.5	129.59	32.49	0.749	0.912	0.222
8	50.0	5.0	0	5.932	5.627	4.262	0.442	0.580	0.645	37.6	75.32	16.79	0.777	0.899	0.153
9	50.0	5.0	0	1.729	1.025	0.416	8.192	6.831	19.425	89.4	34.56	27.08	0.217	0.491	1.807
10	49.0	5.0	0	10.563	10.569	0.175	0.179				169.26	0.00	1.000	NAN	
D				2.676			2.738	2.270							
M				5.657			3.462								
%				47.3			79.1	128.0							

96



На рис. 4.27 та 4.28 представлені залежності модуля пружності I роду ГП від значення магнітної індукції та від довжини дифузору кавітатора для обраних видів ГП.

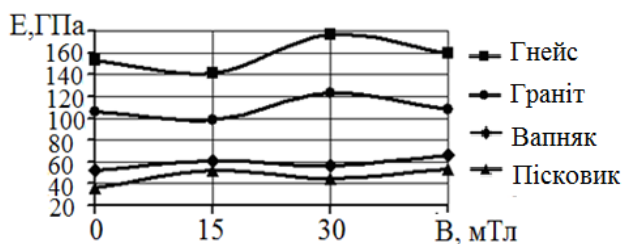


Рисунок 4.27 - Залежність модуля пружності I роду від значення магнітної індукції

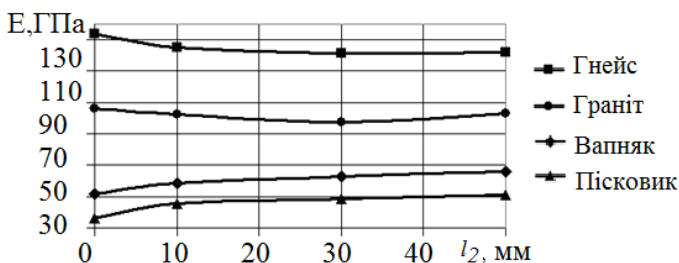


Рисунок 4.28 - Залежність модуля пружності I роду від довжини дифузору

У результаті аналізу залежностей, представлених на рис. 4.27 та рис 4.28, визначено, що модуль пружності для вапняку максимально зріс з 51.84 до 66.25 ГПа, для пісковика - з 35.97 до 57.95 ГПа. Це пов'язано з тим, що за рахунок МГК навантаження зменшується пористість та виникає ущільнення. Також, з насиченням водою ГП (які схильні до водопоглинання) зростають їх пружні властивості [111]. За тією ж причиною спостерігається зростання модуля пружності зі збільшенням довжини дифузору кавітатора в межах

(10...50) мм: для вапняку з 51.84 до 67.51 ГПа та для пісковика з 35.97 до 51.39 ГПа.

Залежність  $f=E(B)$  для пісковика при магнітній індукції 30 мТл досягає піку - 72.95 ГПа. Пік обумовлений завершенням процесу ущільнення під дією МГК навантаження. При цьому пісковик втрачає від 10 до 30 % пористості [113]. У результаті, починається пружно-крихке руйнування. Цим обумовлений спад модуля пружності (надалі  $E$ ) до 53.27 ГПа.

Залежності  $f=E(B)$  досліджуваних пружно-крихких ГП на ділянці А-В спадають: для гнейсу зі 153.55 до 141.22 ГПа та для граніту зі 105.91 до 98.39. Спад  $E$  обумовлений утворенням дефектів та розуцільненням під дією МГК навантаження, рис. 4.29. Цей процес описаний у підрозділі 4.5. Далі, на ділянці Б-В при магнітній індукції 30 мТл спостерігається зростання  $E$ : для гнейсу до 176,26 ГПа та для граніту до 123.23 ГПа. Це обумовлено явищем магнітопластичного ефекту [114]. Його суть полягає у впливі слабкого (до 1.6 Тл) електромагнітного поля на пластичність парамагнітних та діаманітних ГП, до яких відносяться граніт та гнейс. Крім того, спостерігається ініціювання руху крайових дислокацій. Пороговим значенням, при якому починається дія магнітопластичного ефекту, згідно [114] є 0.1 Тл. Проте у роботі [115] досліджено, що під дією зовнішнього електромагнітного поля з магнітною індукцією до 0.1 Тл відбувається приріст активності акустичної емісії. Це говорить про ініціювання руху і росту дислокацій та, як наслідок, тріщиноутворення. Також під час дії слабкого електромагнітного поля з магнітною індукцією до 0.1 Тл, спостерігається зростання пластичності діаманітних та парамагнітних ГП у (1.5...2) рази [116].

За результатами експериментальних досліджень зроблено висновок, що порогове значення виникнення магнітопластичного ефекту є 0.015 Тл. При цьому, для граніту та гнейсу характерне пружно-пластичне деформування, що супроводжується ущільненням і, як наслідок, зростанням модуля пружності.

Після завершення процесу ущільнення, спостерігається пружно-крихке деформування зі спадом модуля пружності для граніту до 107.61 ГПа та для

гнейсу до 159.79 ГПа. Це обумовлено рухом дислокацій під дією електромагнітного поля в межах магнітопластичного ефекту. Процес викликаний «переключенням» спінів дефектів, що приймають участь у деформації. Це призводить до вивільнення дислокацій від закріплюючих їх стопорів (парамагнітних центрів) [117]. Проте, якщо розглядати явище магнітопластичного ефекту для інших ГП, то відрив дислокації від закріплюючих її стопорів під дією слабких електромагнітних полів можливий лише у неврівноважених структурах за рахунок конверсії спінів дислокації та дислокаційних стопорів [116]. Крім того, наявність домішок свинцю у ГП обумовлює негативну дію магнітопластичного ефекту, тобто призводить до ущільнення матеріалу. [118]. Встановлено [114], що час достатній для ефективного депінінгу (відриву) дислокацій від стопорів становить  $10^{-2}$  с. Крім того, напрям руху дислокацій не змінюється зі зміною знаку електромагнітного поля.

Зі збільшенням зовнішнього тиску до 1.6 ГПа, магнітна сприйнятливість ГП зменшується до 50 % від початкового значення [113]. Звідси зроблено висновок, що локально (у місцях схлопування кавітаційних бульбашок біля поверхні ГП) кавітаційне навантаження знижує магнітну сприйнятливість. Згідно Т. Нагата та Н. Кіношита [113] зниження магнітної сприйнятливості є результатом повороту магнітного моменту елементарних об'ємів кристалічних ґраток (доменів) ГП та зміщення доменних меж за рахунок їх взаємодії з дефектами ґраток. Також з підвищенням локальних температур до 1773 К (1500 °С) [119] за рахунок дії кавітації знижується значення намагніченості насичення.

#### **4.5 Локальні дефекти гірських порід до та після навантажень**

Фото зразків граніту без обробки, після обробки МГК навантаженням наведені на рис. 4.29, рис. 4.30 та рис. 4.31, відповідно.

З фото представлених на рис. 4.29 та рис. 4.30 видно, що після обробки граніту гідродинамічним кавітаційним навантаженням на зразку з'явилися локальні скупчення дефектів або зона перед руйнування (позиція 1). Кількість локальних дефектів - 4 одиниці на  $1 \text{ мм}^2$ , середня довжина - 90 мкм. Ці дефекти викликані схлопуванням кавітаційних бульбашок, що супроводжуються викидами енергії.

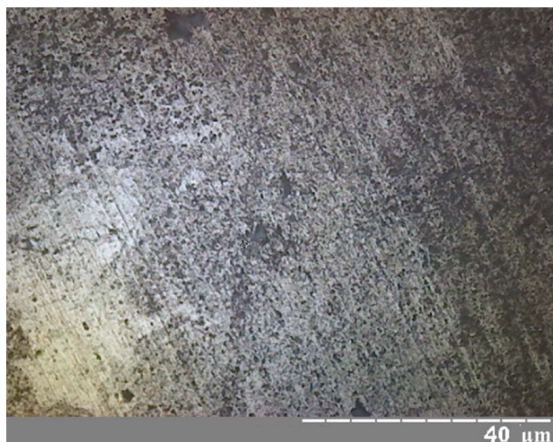


Рисунок 4.29 - Фото зразка граніту до обробки



Рисунок 4.30 - Фото зразка граніту після обробки гідродинамічним кавітаційним навантаженням



Рисунок 4.31 - Фото зразка граніту після обробки магніто-гідродинамічним кавітаційним навантаженням

Під час обробки гідродинамічним кавітаційним навантаженням з додаванням дії магнітної індукції, рис.4.30, локальні дефекти утворюються у більшій кількості, ніж тільки під час гідродинамічного кавітаційного навантаження. Як показали проведені експерименти кількість локальних дефектів - 20 одиниць на  $1 \text{ мм}^2$ , середня довжина - 100 мкм. Результат пояснюється фізичними процесами, описаними у роботах І. М. Федоткіна, Ю. І. Федоткіна, Я. І. Френкеля та інших [119 - 122]. На поверхні кавітаційних бульбашок під час циркуляції рідини навколо каверни виникають електричні заряди. Вони групуються вздовж циркуляційних потоків, створюючи циркуляційний струм. Під час схлопування кавітаційної бульбашки (зі зменшенням її розмірів) відбувається концентрація напруженості електричного поля. Під дією цього електричного поля відбувається активація та іонізація газів всередині бульбашки, що завершується електричним розрядом. У результаті, виникає електричний пробій, який супроводжується появою трьохвалентного кисню. Так збільшується кількість ядер кавітації. Відповідно,

інтенсифікується кавітаційний процес. Це також підтверджено дослідженнями В. І. Классена, Р. Ш. Шафеева, Г. Н. Хажинської, Б. М. Корюкіна та інших [123-124]. Вони експериментально довели за методом Вінклера та пірогаловим методом, що концентрація кисню у воді під час намагнічення зростає на (6...20) % від початкового значення.

Крім того, під дією магнітної індукції відбувається досягнення прецесування молекул води та розчинених у ній домішок за Ларморовим колом з частотою ( $10^8 \dots 10^9$  Гц). Таке субрезонансне навантаження до власної частоти коливань кристалічної структури ГП сприяє утворенню штучної тріщинуватості та ослабленню поверхневого шару.

Ще однією причиною інтенсивного утворення локальних дефектів та тріщин під час МГК навантаження є дрібномасштабна турбулізація води біля поверхні домішок [119, 123, 125]. Зі створенням у рідині магнітного поля, на міжфазних границях (наприклад, рідина - газ, рідина - тверде тіло) виникають індукційні струми зі щільністю  $j_0$  у об'ємі рідини та  $j_{mf}$  на між фазних границях, А/м<sup>2</sup> [119, 123, 125]:

$$j_0 = \sigma_0 \cdot (\vec{V}_0 \cdot \vec{B}_0); \quad (4.2)$$

$$j_{mf} = \sigma_{mf} \cdot (\vec{V}_{mf} \cdot \vec{B}_{mf}), \quad (4.3)$$

де  $\sigma_0$  та  $\sigma_{mf}$  – електропровідність у об'ємі рідини та на між фазних границях, відповідно, 1/Ом;

$\vec{V}_0$  та  $\vec{V}_{mf}$  - швидкість руху рідини у об'ємі рідини та на між фазних границях, відповідно, м/с;

$\vec{B}_0$  та  $\vec{B}_{mf}$  – магнітна індукція у об'ємі рідини та на між фазних границях, відповідно, Тл.

У результаті, по всьому об'єму рідини виникає макро- та мікромасштабна турбулізація. Вона характеризується підвищеною інтенсивністю під час виконання умов виникнення кавітації. Дослідження [123, 125] показали, що за рахунок дії магнітного поля, турбулізація кавітації з деаерацією рідини прискорюється у 2-3 рази. Процес супроводжується високоенергетичними реакціями під час схлопування (колапсу) кавітаційних бульбашок: енергія кавітаційного потоку близько  $(10^4 \dots 10^5)$  кВт/м<sup>3</sup>, швидкість бульбашок  $(550 \dots 650)$  м/с, тиск  $(800 \dots 1000)$  МПа [119].

Крім того, під час МГК навантаження передзародкові місцеві скупчення тріщин граніту, рис. 4.31, в більшості, мають однонаправлений характер. Це пояснюється орієнтацією руху кавітаційних каверн за ларморовим колом. Згідно електрокінетичного ефекту Рейса [106], під дією магнітного поля відбувається намагнічування зважених твердих частинок рідини, бульбашок газу (кавітаційні зародки - нуклеони радіусом  $10^{-9}$  м [119]), колоїдних частинок або краплин іншої рідини, що є ядрами кавітації. Магнітні моменти вище перелічених об'єктів (надалі домішок), згідно ефекту Річардсона - де Гааза – Ейнштейна [106], орієнтуються вздовж вектора магнітної індукції. Це призводить до упорядкованої зміни їх механічних моментів. При цьому, повний механічний момент залишається незмінним. Внаслідок цього, тіло отримує обертальний момент руху і починає прецесувати за ларморовим колом. Також це підтверджується теоремою Лармора (підрозділ 4.2). З теорії ефекту Векслера – Макмілана [106], якщо вектор швидкості руху частинки  $\vec{v}_q$ , що має заряд  $q$  та масу  $m_q$ , утворює прямий кут з лініями вектору магнітної індукції  $\vec{B}$ , то траєкторією частинки є коло радіусом  $R$ , м. Цей параметр є радіусом ларморової прецесії.

$$R = \frac{m_q \cdot v_q}{q \cdot B}, \quad (4.4)$$

З аналізу (4.4) видно, що значення магнітної індукції  $B$  має обернено-пропорційну залежність до радіусу прецесування  $R$ . У промисловому різці

кавітаційному та у експериментальній установці магніти та обмотка розміщені таким чином, що  $B$  зростає в межах від 10 до 50 мТл у напрямку виходу кавітатора з метою фокусування кавітаційного потоку.

При цьому частинка обертається по визначеному радіусу  $R$  з періодом, що не залежить від швидкості руху частинки  $\bar{v}_c$ , с [106]:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \frac{m}{q \cdot B} \quad (4.5)$$

Побудовано топографію поверхні гнейсу до МГК навантаження, рис. 4.32 а) та після, рис. 4.32 б), для порівняння геометричних характеристик природної та штучної тріщинуватості.

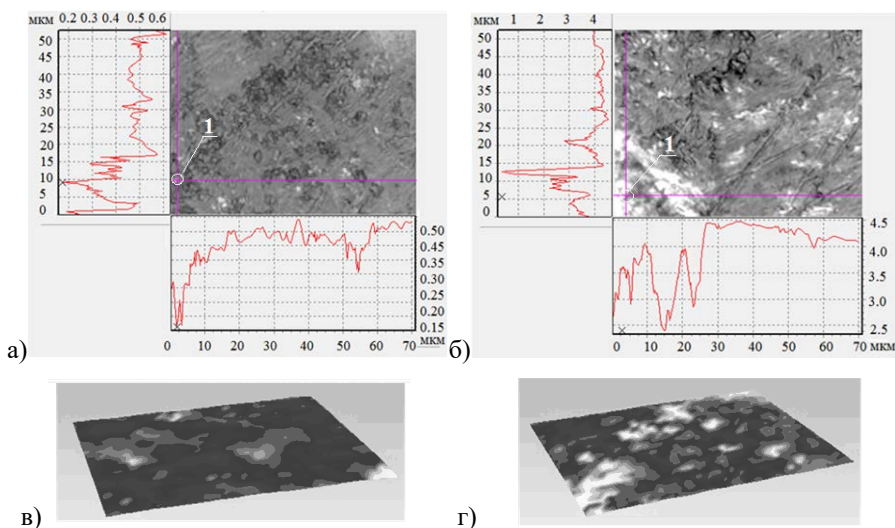


Рисунок 4.32 - Топографія поверхні гнейсу а - до магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження; б - після магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження при магнітній індукції 15 мТл; в - 3D до магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження; г - 3D після



магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження при магнітній індукції 15 мТл

Топографія виконана засобами мікроскопічного дослідження безконтактного інтерференційного 3D профілографу «Мікрон Альфа». З аналізу результатів досліджень профілів поверхонь, рис. 4.32 а) та рис 4.32 б), визначено, що середнє значення глибини дефектів поверхонь після обробки МГК навантаженням ( $B=15$  мТл) зросла з 0.6 мкм до 4 мкм.

Також побудовано тривимірні моделі поверхонь досліджуваних ділянок гнейсу (50x70 мкм). У результаті їх комп'ютерного аналізу, визначено, що після обробки МГК навантаженням трьохвимірна площа зросла з 3681 мкм<sup>2</sup> до 3868 мкм<sup>2</sup>, тобто на 5 %. Це викликано появою дефектностей, що супроводжуються утворенням нових поверхонь. Окрім того, про утворення дефектів свідчить збільшення шорсткості: середнє арифметичне відхилення профілю  $R_a$  - з 0.09 мкм до 0.19; висота нерівностей профілю по десяти точкам  $R_z$  з 0.32 до 0.75 мкм.

На 3D моделі поверхні світло-сірим кольором представлено дефектності (білим колір відповідає найбільшій глибині 5 мкм). Дефектності є впадинами у вигляді кратерів, що виникли у результаті схлопування кавітаційних бульбашок біля поверхні ГП. На рис. 4.32 в) дефекти мають природний характер походження. На рис. 4.32 г) мають місце природна та штучно внесена тріщинуватість, що виникли у результаті схлопування кавітаційних бульбашок біля поверхні матеріалу. Площа поверхні дефектів від загальної площі у першому випадку займає біля 15 %, у другому - близько 40 %.

#### **4.6 Зміна питомої поверхневої енергії під дією магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження**

Як відомо, зміна ППЕ впливає на руйнування твердого тіла. У попередніх дослідженнях ППЕ розглядається як «константа матеріалу». Вчені надають їй

різну інтерпретацію. Згідно експериментальних даних [27], ППЕ залежить від фізико-механічних властивостей середовища і впливає на швидкість поширення тріщини. Ці експериментальні дані спростовують припущення, що ППЕ є «константою матеріалу». Для експериментального дослідження зміни ППЕ обрано МГК навантаження [126].

В ході експериментальних та аналітичних досліджень визначено вплив зміни магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора на ППЕ ГП. Для експериментального визначення ППЕ обраних зразків ГП встановлено наступні параметрами: модуль пружності визначався за допомогою наноіндентометра «Мікрон Гамма» (рис. 2.5, рис. 4.27 та рис. 4.28); радіус дії молекулярних зв'язків та відстань між сусідніми площинами розщеплення (табл. 4.3), отриманими на рентгенівському дифрактометрі «Rigaku Ultima IV» (рис. 2.6).

Таблиця 4.3 - Молекулярні параметри гірських порід, що визначають питому поверхневу енергію.

Гірська порода	Радіус дії молекулярних зв'язків, Å	Відстань між площинами розщеплення	Вид гірської породи	Радіус дії молекулярних зв'язків, Å	Відстань між площинами розщеплення, Å
Пісковик	11.7	9.0	Гнейс	7.1	11.8
Вапняк	24	18	Граніт	14	24

Побудовано експериментальні та теоретичні залежності ППЕ від магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора, рис. 4.33.

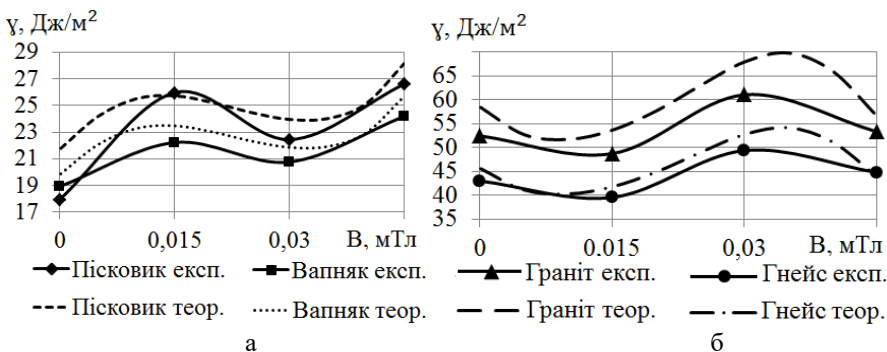


Рисунок 4.33 - Залежності питомої поверхневої енергії від магнітної індукції пісковика та вапняку (а), граніту та гнейсу (б)

Залежності побудовано на основі даних, представлених на рис. 4.27 - 4.28, та у табл. 4.3, Встановлені значення ППЕ співпали з експериментальними дослідженнями Гілмана [127].

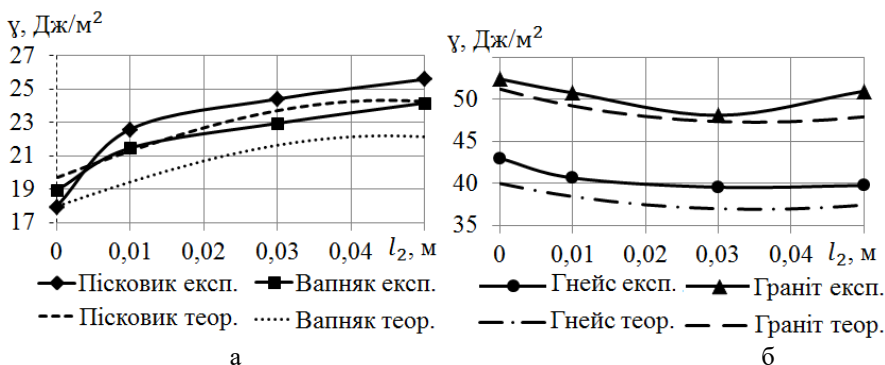


Рисунок 4.34 - Залежності питомої поверхневої енергії від довжини дифузору кавітатора пісковика та вапняку (а), граніту та гнейсу (б)

Теоретичні залежності рисунків 4.33 та 4.34 побудовані за математичною моделлю (3.21), відкоригованою на основі регресійного аналізу згідно експериментальних даних до вигляду (4.6), Дж/м<sup>2</sup>:

$$\gamma = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_{kp} \cdot N_a^2}{Y_0 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot v_{np}^3 \cdot \zeta \cdot P}, \quad (4.6)$$

де  $P$  – поліном магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора робочого органу: для пружно-крихких ГП (4.7); для пружно-пластичних ГП (4.8).

$$P = \frac{\left(-0.1078 \cdot l_2^2 - 0.0076 \cdot l_2 + 0.0016\right)}{(50.1728 \cdot B^3 - 3.2622 \cdot B^2 + 0.0463 \cdot B + 0.0014)^{-1}}; \quad (4.7)$$

$$P = \frac{\left(0.6023 \cdot l_2^2 - 0.0542 \cdot l + 0.0064\right)}{(-119.0617 \cdot B^3 + 8.1667 \cdot B^2 - 0.1558 \cdot B + 0.0058)^{-1}}. \quad (4.8)$$

Поліноми (4.7) та (4.8) отримано на основі регресійного аналізу для приведення математичної моделі ППЕ (4.6) до емпіричного вигляду. Межі її застосування:

- магнітна індукція у дифузори кавітатора різця кавітаційного від 15 до 45 мТл;
- довжина дифузору від 0.01 м до 0.05 м.

Для інших діапазонів вказаних параметрів потрібно проводити додаткові дослідження на перевірку похибки аналітичних та експериментальні результатів значень ППЕ.

Залежності, ППЕ від магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора за характером подібні до залежностей, модуля пружності від тих же параметрів. Це пов'язано з тим, що одним із ключових параметрів які визначають ППЕ є пружні властивості ГП.

#### 4.7 Енергоємність руйнування зі зміною питомої поверхневої енергії

Експериментально визначено залежності зміни ППЕ та енергоємності руйнування від зміни магнітної індукції, що діє на зразки ГП граніту та гнейсу – рис. 4.35, пісковика та вапняку – рис. 4.36. Залежності, представлені на рис. 4.35 мають спадно-зростаючий поліноміальний характер. На першій ділянці (0...15) мТл ППЕ спадає: для граніту з 52.43 до 48.71 Дж/м<sup>2</sup>; для гнейсу з 42.99 до 39.53 Дж/м<sup>2</sup>. Спад  $\gamma$  обумовлений утворенням дефектів та знеміцненням під дією МГК навантаження. На ділянці (15...30) мТл спостерігається зростання  $\gamma$ : для гнейсу до 49.35 Дж/м<sup>2</sup>; для граніту до 61.01 Дж/м<sup>2</sup>. Це обумовлено явищем

магнітопластичного ефекту [128]. Під дією слабкого електромагнітного поля зростає пластичність граніту та гнейсу. У результаті чого спостерігається ущільнення, та, як наслідок, зростання  $\gamma$ .

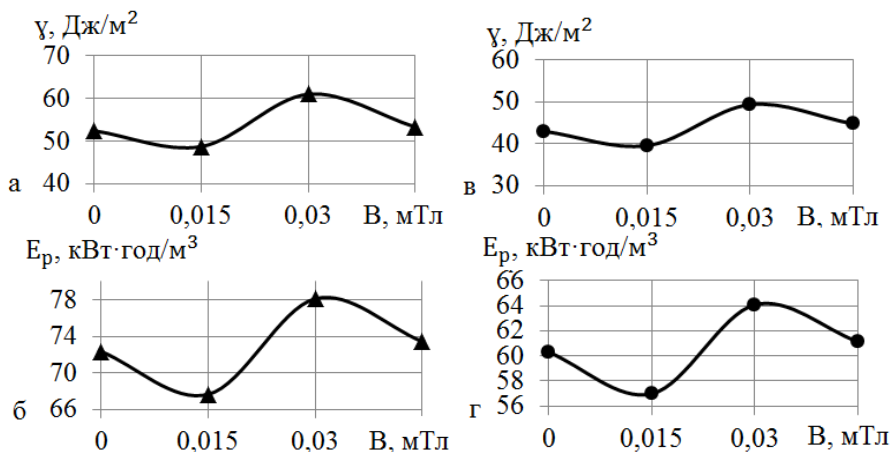


Рисунок 4.35 - Залежності питомої поверхневої енергії (а, в) та енергоємності руйнування (б, г) від магнітної індукції а, б - граніту; в, г - гнейсу

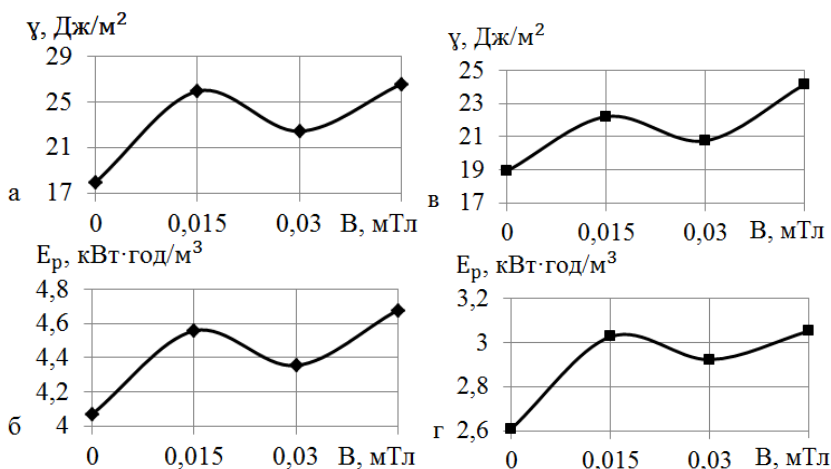


Рисунок 4.36 - Залежності питомої поверхневої енергії (а, в) та енергоємності руйнування (б, г) від магнітної індукції для: а, б – пісковика; в, г - вапняку

Після завершення процесу ущільнення, при магнітній індукції 30 мТл, починається знеміцнення, що характеризується спадом ППЕ: для граніту до 53.27 Дж/м<sup>2</sup>, для гнейсу до 44.74 Дж/м<sup>2</sup>.

Для пружно-пластичних, обраних різновидів, ГП вапняку та пісковика залежності ППЕ та енергоємності руйнування, представлені на рис. 4.36, мають зростаюче-спадний характер. Тобто, обернений до залежностей пружно-крихких ГП гнейсу та граніту. Це обумовлено тим, що у пружно-пластичних ГП має місце зворотній магнітопластичний ефект. Тобто, під час прикладення зовнішнього магнітного поля зростають їх пружні властивості. Процес супроводжується зростанням ППЕ при магнітній індукції (0...45) мТл: для вапняку з 18.93 Дж/м<sup>2</sup> до 24.19 Дж/м<sup>2</sup>; для пісковика з 17.96 Дж/м<sup>2</sup> до 26.60 Дж/м<sup>2</sup>. Це пов'язано з тим, що під дією МГК навантаження відбувається зменшення пористості на (10...30) %, ущільнення та насичення водою, що сприяє зростанню пружних властивостей матеріалів. Звідси, зроблено висновок, що руйнування з додатковим МГК навантаженням доцільно використовувати для пружно-крихких ГП.

Базовою моделлю для встановлення залежності між енергоємністю руйнування та ППЕ обрано (1.12). Вона містить теоретичну межу міцності  $\sigma_T$ , що за фізичною суттю є мірою кількості енергії (Дж=кВт·год/м<sup>3</sup>), яка витрачається на утворення одиниці об'єму зруйнованого матеріалу (м<sup>3</sup>) [146]. На основі цього  $\sigma_T^2$  розкладено на дві складові: власне  $\sigma_T$  та енергоємність руйнування  $E_p$ . У результаті (1.12) приймає вигляд:

$$l_{kp} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot E_p}, \quad (4.9)$$

Враховано наявність тріщин в ГП через параметр  $l_{kp}$ . В механіці руйнування довжина тріщини вважається критичною, якщо під час її розвитку

кількість виділеної пружної енергії більше кількості енергетичних витрат пластичної деформації [129].

З (4.9) виражено енергоємність руйнування, кВт·год/м<sup>3</sup>:

$$E_p = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.10)$$

У результаті аналізу експериментальних залежностей, представлених на рис. 4.35 – 4.36 та на основі методу регресійного аналізу, проведено коригування математичної моделі енергоємності руйнування для кожного з досліджуваних різновидів ГП: пісковика  $E_p(\Pi)$ , вапняку  $E_p(B)$ , гнейсу  $E_p(\Gamma_n)$  та граніту  $E_p(\Gamma_p)$ , кВт·год/м<sup>3</sup>.

$$E_p(\Pi) = \frac{2 \cdot (2.2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(\gamma) - 1.0391 \cdot 10^{-9}) \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.10)$$

$$E_p(B) = \frac{2 \cdot (2.2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(\gamma) - 20.8393 \cdot 10^{-9}) \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}},$$

$$(4.11) E_p(\Gamma_n) = \frac{2 \cdot (33.2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(\gamma) - 1.0391 \cdot 10^{-9}) \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.12)$$

$$E_p(\Gamma_p) = \frac{2 \cdot (38.2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(\gamma) - 1.0391 \cdot 10^{-9}) \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (4.13)$$

Розроблені математичні моделі енергоємності руйнування ГП (4.10) – (4.13) відрізняється від відомих тим, що враховує ППЕ та довжину критичної тріщини.

Математичні моделі (4.10) – (4.11) доцільно використовувати для ГП зі значенням ППЕ в межах (15...30) Дж/м<sup>2</sup>; (4.12) – (4.13) - для ГП зі значенням ППЕ в межах (30...70) Дж/м<sup>2</sup>.

На основі (4.10) – (4.13) побудовано залежності енергоємності руйнування від ППЕ, рис. 4.37.

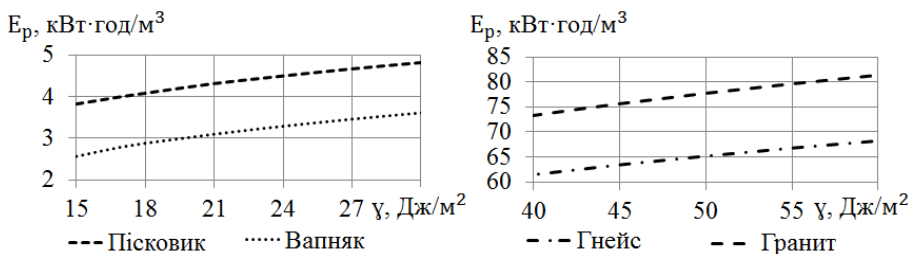


Рисунок 4.37 - Залежності енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії

Залежності мають зростаючий логарифмічний характер. Це обумовлено законом Рітінгера (1867 р.), згідно якому ППЕ пропорційна роботі, утворення нових поверхонь матеріалу [130]. Відповідно, зростання ППЕ, викликає збільшення енергоємності руйнування.

#### 4.8 Рівняння регресії питомої поверхневої енергії

У результаті експериментальних досліджень ППЕ від незалежних змінних параметрів: магнітної індукції та довжини дифузору кавітатора різця кавітаційного сформовано таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Залежність питомої поверхневої енергії від незалежних змінних параметрів

№ дослідів	$x_1$ - магнітна індукція у дифузори В, Тл	$x_2$ - довжина дифузору $l_2$ , м	$y$ - питома поверхнева енергія, Дж/м²
1	2	3	4
1	0.015	0.1	50.79
2	0.015	0.3	48.71
3	0.015	0.5	50.99



Закінчення таблиці 4.4

1	2	3	4
4	0.030	0.1	64.06
5	0.030	0.3	61.01
6	0.030	0.5	63.45
7	0.045	0.1	56.43
8	0.045	0.3	53.28
9	0.045	0.5	55.94

За таблицями 2.3 та 4.4 побудовано матриці планування умов і результатів досліджень ППЕ від магнітної індукції у дифузорі та довжини дифузору. Дивись рис. 4.38, лістинг програми MathCAD.

$$X := \begin{pmatrix} 1 & 0.015 & 0.1 & 0.0015 & 0.000225 & 0.01 \\ 1 & 0.015 & 0.3 & 0.0045 & 0.000225 & 0.09 \\ 1 & 0.015 & 0.5 & 0.0075 & 0.000225 & 0.25 \\ 1 & 0.030 & 0.1 & 0.003 & 0.0009 & 0.01 \\ 1 & 0.030 & 0.3 & 0.009 & 0.0009 & 0.09 \\ 1 & 0.030 & 0.5 & 0.015 & 0.0009 & 0.25 \\ 1 & 0.045 & 0.1 & 0.0045 & 0.002025 & 0.01 \\ 1 & 0.045 & 0.3 & 0.0135 & 0.002025 & 0.09 \\ 1 & 0.045 & 0.5 & 0.0225 & 0.002025 & 0.25 \end{pmatrix} \quad Y := \begin{pmatrix} 50.79 \\ 48.71 \\ 50.99 \\ 64.06 \\ 61.01 \\ 63.45 \\ 56.43 \\ 53.28 \\ 55.94 \end{pmatrix}$$

$$X0 := X^T$$

$$X0 \cdot X = \begin{pmatrix} 9 & 0.27 & 2.7 & 0.081 & 9.45 \times 10^{-3} & 1.05 \\ 0.27 & 9.45 \times 10^{-3} & 0.081 & 2.835 \times 10^{-3} & 3.645 \times 10^{-4} & 0.032 \\ 2.7 & 0.081 & 1.05 & 0.032 & 2.835 \times 10^{-3} & 0.459 \\ 0.081 & 2.835 \times 10^{-3} & 0.032 & 1.103 \times 10^{-3} & 1.093 \times 10^{-4} & 0.014 \\ 9.45 \times 10^{-3} & 3.645 \times 10^{-4} & 2.835 \times 10^{-3} & 1.093 \times 10^{-4} & 1.488 \times 10^{-5} & 1.103 \times 10^{-3} \\ 1.05 & 0.032 & 0.459 & 0.014 & 1.103 \times 10^{-3} & 0.212 \end{pmatrix}$$

$$X0 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.015 & 0.015 & 0.015 & 0.03 & 0.03 & 0.03 & 0.045 & 0.045 & 0.045 \\ 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.3 & 0.5 \\ 1.5 \times 10^{-3} & 4.5 \times 10^{-3} & 7.5 \times 10^{-3} & 3 \times 10^{-3} & 9 \times 10^{-3} & 0.015 & 4.5 \times 10^{-3} & 0.014 & 0.023 \\ 2.25 \times 10^{-4} & 2.25 \times 10^{-4} & 2.25 \times 10^{-4} & 9 \times 10^{-4} & 9 \times 10^{-4} & 9 \times 10^{-4} & 2.025 \times 10^{-3} & 2.025 \times 10^{-3} & 2.025 \times 10^{-3} \\ 0.01 & 0.09 & 0.25 & 0.01 & 0.09 & 0.25 & 0.01 & 0.09 & 0.25 \end{pmatrix}$$

$$(X_0 \cdot X)^{-1} = \begin{pmatrix} 10.212 & -541.667 & -20.625 & 250 & 7.407 \times 10^3 & 19.792 \\ -541.667 & 3.88 \times 10^4 & 250 & -8.333 \times 10^3 & -5.926 \times 10^5 & -2.604 \times 10^{-11} \\ -20.625 & 250 & 141.667 & -833.333 & -1.245 \times 10^{-10} & -187.5 \\ 250 & -8.333 \times 10^3 & -833.333 & 2.778 \times 10^4 & -5.213 \times 10^{-9} & 7.575 \times 10^{-11} \\ 7.407 \times 10^3 & -5.926 \times 10^5 & 2.677 \times 10^{-11} & -8.923 \times 10^{-10} & 9.877 \times 10^6 & 8.224 \times 10^{-12} \\ 19.792 & -5.479 \times 10^{-11} & -187.5 & 7.228 \times 10^{-11} & 5.147 \times 10^{-10} & 312.5 \end{pmatrix}$$

$$(X_0 \cdot X)^{-1} \cdot (X_0 \cdot Y) = \begin{pmatrix} 21.027 \\ 2.892 \times 10^3 \\ -38.175 \\ -57.5 \\ -4.511 \times 10^4 \\ 65.25 \end{pmatrix}$$

Рисунок 4.38. - Матриці планування умов і результатів досліджень питомої поверхневої енергії від магнітної індукції у дифузори та довжини дифузору. Лістинг програми MathCAD

В результаті ряду математичних перетворень цих матриць отримано значення коефіцієнтів рівняння регресії. Звідси, (2.1) приймає вигляд, Дж/м<sup>2</sup>:

$$\gamma = y_n = 21.027 + 2892 \cdot B - 38.175 \cdot l_2 - 57.5 \cdot B \cdot l_2 - 45110 \cdot B^2 + 65.25 \cdot l_2^2. \quad (4.14)$$

Результати аналітичних досліджень ППЕ від магнітної індукції у дифузори та довжини дифузору на основі рівняння регресії представлені у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 Результати аналітичних досліджень питомої поверхневої енергії на основі рівняння регресії

$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_9$
51.01	48.42	51.05	63.85	61.09	63.55	56.40	53.46	55.75

Середньоквадратичне відхилення виражене дисперсією рівняння регресії згідно (2.11), Дж/м²:

$$s_y^2 = \frac{1}{9-1} \cdot \sum_1^9 \left( \begin{aligned} &(51.01 - 50.79)^2 + (48.42 - 48.71)^2 + (51.05 - 50.99)^2 + \\ &+ (63.85 - 64.06)^2 + (61.09 - 61.01)^2 + (63.55 - 63.45)^2 + \\ &+ (56.40 - 56.43)^2 + (53.46 - 53.28)^2 + (55.75 - 55.94)^2 \end{aligned} \right) = 0.03. \quad (4.15)$$

Розрахункова середня змінна стану виражена через середнє значення дисперсії, згідно (2.14), Дж/м²:

$$y_u = \frac{1}{9} \cdot \sum_1^9 \left( \begin{aligned} &51.01 + 48.42 + 51.05 + 63.85 + 61.09 + 63.55 + \\ &+ 56.40 + 53.46 + 55.75 \end{aligned} \right) = 56.06. \quad (4.16)$$

Похибка досліджень, в.о.:

$$\Delta y = \frac{1}{9} \cdot \sum_1^9 \left( \begin{aligned} &\left( \frac{51.01 - 50.79}{51.01} + \frac{48.42 - 48.71}{48.42} + \frac{51.05 - 50.99}{51.05} + \right. \\ &+ \frac{63.85 - 64.06}{63.85} + \frac{61.09 - 61.01}{61.09} + \frac{63.55 - 63.45}{63.55} + \\ &\left. + \frac{56.40 - 56.43}{56.40} + \frac{53.46 - 53.28}{53.46} + \frac{55.75 - 55.94}{55.75} \right) \cdot 100 = 0.028 \end{aligned} \right) \quad (4.17)$$

## Висновки

1. Визначено спадно-зростаючі поліноміальні залежності зміни енергоємності руйнування гірських порід під час їх знеміцненні магніто-гідродинамічним кавітаційним навантаженням та розроблено математичну модель, що дозволяє врахувати питому поверхневу енергію та довжину критичної тріщини.

2. Встановлено, що для гнейсу та граніту енергоємність руйнування спадає з 61 кВт·год/м<sup>3</sup> до 57 кВт·год/м<sup>3</sup> та з 73 кВт·год/м<sup>3</sup> до 68 кВт·год/м<sup>3</sup> під час зниження питомої поверхневої енергії, відповідно, зі 42.99 Дж/м<sup>2</sup> до 39.53 Дж/м<sup>2</sup> та з 52.43 Дж/м<sup>2</sup> до 48.71 Дж/м<sup>2</sup>.

3. Для граніту та гнейсу модуль пружності I роду знижено зі 105.91 до 98.39 ГПа та зі 153.55 до 141.22 ГПа, відповідно, під час магніто-гідродинамічному кавітаційному навантаженні з магнітною індукцією 15 мТл.

4. Для пісковика та вапняку зі зростанням магнітної індукції від 0 до 45 мТл спостерігалось зростання модуля пружності від 35.97 до 72.95 та від 51.84 до 66.25 ГПа, відповідно.

## РОЗДІЛ 5

### ПРОМИСЛОВА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБЕРТОВОГО МАГНІТО-ГІДРОДИНАМІЧНОГО КАВІТАЦІЙНОГО РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД

#### 5.1 Умови промислової реалізації

Впровадження ОМГК руйнування ГП з індукційним фокусуванням кавітаційного потоку (далі обертово-магніто-гдрокавітаційне руйнування) проводилось на кварцитовому кар'єрі Товкачівського гірничо-збагачувального комбінату (ГЗК), додаток А. Фізико-механічні характеристики кварцитів представлені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Фізико-механічні характеристики кварцитів Товкачівського ГЗК

Параметр	Значення
Міцність на стиснення, МПа	250
Питома вага, кг/м <sup>3</sup>	2600
Твердість за шкалою проф. М. М. Протодьяконова, в. о.	10...12
Модуль пружності, ГПа	165
Потужність шару кварциту, м	23

Апробацію нового ОМГК руйнування ГП проведено на базі бурової установки Diames 232 (Виробництва фірми Atlas Copco, Швеція). Характеристики бурової установки представлені у табл. 5.2

Під час буріння свердловин для промивки установку Diames 232 [136] оснащено буровим насосом НБ5-320/100 [137] з продуктивністю – 0.005 м<sup>3</sup>/с. Для буріння використано бурові штанги Steel 60 [136].

Руйнування кварцитів проводилось на горизонті 40 м. У результаті, пробурено 20 свердловин глибиною по 15 м, розташованими в два ряди (у кожному по 10 свердловин). Відстань між рядами 7 м.

Таблиця 5.2 - Характеристики бурової установки Diames 232

Параметр	Значення
Діаметр свердловини, мм	110
Максимальна глибина буріння, м	450
Кут нахилу свердловини, градус	0...90
Потужність приводу обертача, кВт	15
Витрати промивної рідини, м³/с	0.005
Частота обертання інструменту, об/хв.	550-2200

Орієнтовний час проведення усіх дослідів по визначенню енергоємності ОМГК руйнування кварцитів, год [138]:

$$t_{\partial} = n \sum_{i=1}^m t_i \cdot p_i = 1 \cdot \sum_{i=1}^5 3.75 \cdot 4 = 60, \quad (5.1)$$

де  $n$  – кількість серій випробувань, шт.;

$m$  – кількість досліджуваних точок, шт.;

$t_i$  – час проведення дослідів, год;

$p_i$  – повторюваність кожного дослідів, шт.

Кількість серій випробувань – 1, так як досліджується в промислових умовах залежність енергоємності руйнування від одного параметру - магнітної індукції. Повторюваність кожного дослідів визначена у другому розділі даної дисертації – 4 рази, з яких 1 основний і 3 повторних. Кількість досліджуваних точок енергоємності руйнування кварцитів – 5:

- під час традиційного обертового руйнування - 1-ша точка;

- під час ОМГК руйнування - 4 точки для магнітної індукції - 0 мТл, 15 мТл, 30 мТл, 45 мТл.

Час проведення одного досліджу – це середній час буріння однієї свердловини глибиною 15 м та діаметром 110 мм – 3 год 45 хв.

Трудоємність проведення дослідів  $Q$ , людино-годин:

$$Q = n \sum_{i=1}^m t_i p_i z_i = 1 \cdot \sum_{i=1}^5 3.75 \cdot 4 \cdot 2 = 120, \quad (5.2)$$

де  $z_i$  – кількість робітників, людей.

Отримані значення  $t_d$  та  $Q$  збільшено вдвічі [138], оскільки під час їх визначення не ураховані витрати на допоміжні та організаційні роботи такі як: підготовка бурового розчину; монтаж обладнання; перевірка справності роботи, транспортування та установка бурової установки на місці буріння тощо. Отже,  $t_d=120$  год та  $Q=240$  людино-годин.

У якості промивної рідини використано багатофазний полідисперсний буровий розчин за ГОСТ 33213-2014 [139] зі щільністю 1130 кг/м<sup>3</sup>, з вмістом до 5 % бентоніту ГОСТ 25795-83 [140] та поверхнево-активних речовин (сульфолон - 0,3 %; допоміжна речовина ОП-10 - 0,6 % за ГОСТ 8433-81 [141]; сульфонатрієві солі - 1,5%). Поверхнево-активні речовини, що містяться у буровому розчині полегшують процес розриву середовища на межі розділення двох фаз під час кавітації [142]. Крім того, кавітаційні процеси у буровому розчині супроводжуються диспергуванням твердих частинок з утворенням дрібнодисперсної структури. Це сприяє зниженню рівня ризику заклинювання роботи інструменту.

Кавітація у буровому розчині та у воді має відмінності. Це пов'язано з різними значеннями їх щільності. Остання впливає на величину локального тиску, а відповідно, і на число кавітації.

Вплив стисливості бурового розчину на утворення і перебіг процесу кавітації під час ОМГК руйнування ГП не враховувався. Це обумовлено тим,

що локальні перепади тисків під час руху рідини мають менший вплив, ніж об'ємний модуль її пружності [107]. Тому, буровий розчин вважається не стисливою рідиною.

В'язкість рідини, у якій утворюється кавітація, визначає дисипацію механічної енергії у процесі зростання та схлопування кавітаційних бульбашок. Збільшення в'язкості рідини призводить до зменшення максимального розміру бульбашки, а також швидкості її зростання та схлопування. Відомо [107], що значення в'язкості нормальних рідини можуть відрізнятися в тисячі разів. Проте, в'язкість води мала ( $1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$  [143]). тому її впливом на кавітацію можна знехтувати. В'язкість бурового розчину, використаного під час проведення промислового експерименту ( $1.5 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ ), наближена до в'язкості води, тому її значення не враховувалось. Але у разі використання обважених бурових розчинів під час ОМГК руйнування ( $\rho \approx 2000 \text{ кг/м}^3$ ) потрібно проводити розрахунок в'язких напружень, швидкості зростання та схлопування кавітаційних бульбашок. Для цього рекомендовано використовувати рівняння Нав'є-Стокса [144] та методику Порицького [145]. Це необхідно для перевірки доцільності використання запропонованого способу руйнування ГП зі зміною технологічних умов. До того ж, формування штучної тріщинуватості під дією МГК навантаження виникає лише у тих свердловинах, де тиск на вибої не перевищує критичний тиск води  $P_{кр}=22.1 \text{ МПа}$  [146]. За умови виникнення тиску вище критичного значення пароутворення у потоці рідини є неможливим, тобто кавітація не утворюється. При цьому тиск насиченої пари глинистої промивної рідини, що відповідає початку кавітаційного процесу  $8320 \text{ Па}$  при  $t=323\text{K}$  [147].



## 5.2 Енергоємність руйнування традиційним обертовим та обертовим магніто-гідродинамічним кавітаційним способами

Енергоємність руйнування  $E_p$  кварцитів Товкачівського ГЗК традиційним обертовим руйнуванням та ОМГК визначалась з формули, кВт·год/м<sup>3</sup> [79]:

$$E_p = \frac{P \cdot t}{V_n}, \quad (5.3)$$

де  $P$  – потужність, спожита з мережі для руйнування гірської породи, кВт;

$t$  – час руйнування, с;

$V_n$  – об'єм зруйнованої гірської породи, м<sup>3</sup>.

Середня потужність, спожита з мережі визначалась за допомогою ватметра Д-365 (ТУ 25-04.3295-77 [148]). Значення фіксувались кожні 4 секунди, що відповідає часу встановлення показань. Клас точності – 1.5. Перевагами є те, що він розрахований на роботу в умовах вібрацій з прискоренням 15 м/с<sup>2</sup> та частотою 30 Гц. Допустима дія ударів з прискоренням 70 м/с<sup>2</sup>. Напряга живлення – 380 В, частота – 50 Гц, діапазон вимірювань до 30 кВт.

Час буріння свердловини визначався промисловим секундоміром ИВ-2 (ГОСТ 8.286-78 [149]). Вибір такого типу секундоміру обумовлений тим, що він адаптований до роботи на добувних виробництвах. Призначений для контролю часу роботи електромеханічних пристроїв. Під час проведення досліджень енергоємності руйнування кварцитів зі зміною магнітної індукції включений у лінію живлення бурової установки і синхронно вмикався і вимикався разом з роботою останньої. Це дозволило визначити час буріння свердловини з максимальною точністю - 0.01 с. Допустима напруга живлення – 380 В або 660 В, частота – 50 Гц.

Усі свердловини виконані у ході промислової апробації ОМГК руйнування ГП мали однакові глибину  $l_{ce}=15$  м та діаметр  $D_{ce}=0.011$  м. Об'єм зруйнованої ГП  $V_n$  під час буріння однієї свердловини, м<sup>3</sup>:

$$V_n = l_{ck} \cdot \left( \frac{\pi \cdot D_{ce}^2}{4} \right) = 15 \cdot \left( \frac{3.14 \cdot 0.011^2}{4} \right) = 0.14. \quad (5.4)$$

У табл. 5.3 Представлено результати досліджень енергоємності руйнування кварцитів Товкачівського кар'єра традиційним обертовим та запропонованим ОМГК способом зі зміною магнітної індукції у кавітаторі. Діапазон та крок варіювання магнітної індукції прийняті (від 0 до 45 мТл з інтервалом 15 мТл). Це зроблено для промислової перевірки та підтвердження спадно-зростаючого характеру експериментальних лабораторних залежностей енергоємності руйнування ГП від магнітної індукції у дифузори кавітатора робочого інструменту.

Таблиця 5.3 - Порівняння енергоємності руйнування кварцитів Товкачівського кар'єра обертовим та обертовим магніто-гідродинамічним кавітаційним способом

Спосіб руйнування	Магнітна індукція у кавітаторі робочого інструменту $B$ , мТл	Середня потужність, кВт	Час руйнування, год	Об'єм зруйнованої гірської породи, м <sup>3</sup>	Енергоємність, кВт·год/м <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6
Обертовий	-	3.45	3.85	0.14	95
Обертово-магніто-гідро-кавітаційний	0	3.42	3.77	0.14	92
	15	3.27	3.72	0.14	87
	30	3.47	3.79	0.14	94
	45	3.44	3.78	0.14	93

З аналізу даних табл. 5.3 визначено, що мінімальна енергоємність руйнування кварцитів Товкачівського ГЗК спостерігається при магнітній індукції у дифузорі кавітатора робочого органу 15 мТл. Це обумовлено дією магнітопластичного ефекту. Детально процес описаний у підрозділах 4.4-4.7.

Аналітична залежність  $E_p=f(B)$ , побудована на основі (4.12) та (4.13):

$$E_p = \frac{(38.2608 \cdot 10^{-8} \cdot \ln \left( \frac{A}{50.1728 \cdot B^3 - 3.2622 \cdot B^2 + 0.0463 \cdot B + 0.0014} - 1.0391 \cdot 10^{-9} \right))}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}} \cdot \frac{2 \cdot E}{\pi \cdot \sigma_T \cdot l_{kp}}, \quad (5.5)$$

де  $A$  – коефіцієнт, обумовлений значенням питомої поверхневої енергії.

$$A = \frac{2 \cdot \hbar^4 \cdot \omega^4 \cdot l_{kp} \cdot N_a^2}{Y_0 \cdot d^4 \cdot m^2 \cdot H^2 \cdot Z \cdot Q \cdot \rho \cdot \delta \cdot v_{np}^3 \cdot \zeta \cdot \left( -0.1078 \cdot l_2^2 - 0.0076 \cdot l_2 + 0.0016 \right)}. \quad (5.6)$$

Аналітична залежність енергоємності руйнування кварцитів порівнювалась із залежністю, отриманою у промислових умовах рис. 5.1.

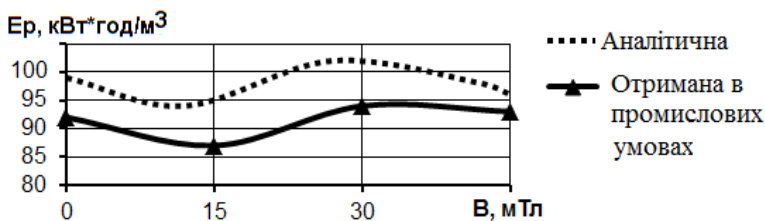


Рисунок 5.1 - Залежності енергоємності руйнування кварцитів Товкачівського ГЗК від значення магнітної індукції різця кавітаційного: аналітична та отримана в промислових умовах

Характер залежності  $E_p=f(B)$ , рис. 5.1, отриманої у промислових умовах Товкачівського ГЗК, співпадає з характером лабораторних залежностей, описаних у підрозділі 4.7. Похибка досліджень залежності енергоємності руйнування кварцитів від зміни магнітної індукції різця кавітаційного не перевищує 9.2 %. Похибка обумовлена тим, що у реальних умовах масив знаходиться у напруженому стані, що не ураховано у математичній моделі. Для його ураховання необхідно ускладнення моделі, що не є доцільним при отриманому значенні похибки.

Під час впровадження запропонованого ОМГК руйнування ГП при магнітній індукції 15 мТл у дифузорі кавітатора робочого органу вдалось досягти зниження енергоємності на 8.4 %.

Перевірка адекватності математичної моделі (5.6), проведена за критерієм Фішера F [150], в. о.

$$F \geq (S_{ad1}^2 / S_{ad2}^2), \quad (5.7)$$

де  $S_{ad1}$  та  $S_{ad2}$  – дисперсія адекватності теоретичної та експериментальної залежностей, відповідно, кВт·год/м<sup>3</sup>.

$$\begin{aligned} S_{ad1}^2 &= \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \\ &= \frac{(99-97)^2 + (95-97)^2 + (102-97)^2 + (96-97)^2}{4-1} = 11.3; \end{aligned} \quad (5.8)$$

$$\begin{aligned} S_{ad2}^2 &= \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2 = \\ &= \frac{(92-92)^2 + (87-92)^2 + (94-92)^2 + (93-92)^2}{4-1} = 10.0. \end{aligned} \quad (5.9)$$

де  $n$  та  $m$  – число ступенів свободи аналітичної та промислової залежностей, відповідно, шт.;

$x_i$  та  $y_i$  – значення параметрів вибірки аналітичної та промислової залежностей, відповідно, кВт·год/м<sup>3</sup>;

$\bar{x}$  та  $\bar{y}$  – середнє значення параметрів вибірки аналітичної та промислової залежностей, відповідно, кВт·год/м<sup>3</sup>.

Для умов промислового дослідження залежності енергоємності руйнування ГП від магнітної індукції кавітатора значення критерію Фішера з довірчою імовірністю 0.95:  $F=6.39$ , що  $\geq 1.13$  [150]. Отже, згідно критерію Фішера математична модель (5.6) адекватна.

### 5.3 Економічна ефективність промислового впровадження

Перевагами ОМГК руйнування ГП є те що не вимагається додаткових витрат на модернізацію обладнання та зміну технологічних умов (потужності двигуна, діаметру штанги, швидкості різання тощо). Тому, рівень виробничих витрат умовно-постійних: на амортизацію, експлуатацію та утримання обладнання, на заробітну плату не зросли. До категорії витрат, що збільшились відносяться лише витрати на виготовлення різця кавітаційного, рис. 5.2.

Додаткові витрати на різець кавітаційний для впровадження ОМГК способу складають 4100 грн. і формуються з: витрат на проектування (1200 грн) і виготовлення оригінального інструменту (токарні роботи по виготовленню корпусу 1 з ріжучими кромками 4, дифузором кавітатора 5 та промивним каналом 6 - 1050 грн., токарні роботи по виготовленню кожуху 3 - 340 грн.) та на матеріали (сталь 40 ХН - 350 грн., вставки твердосплавні 7 у кількості 14 шт.- 975 грн., магніти 2 – 225 грн.). Для кожуху та корпусу використано сталь марки 40 ХН за ГОСТ4543-71 [151], твердосплавні вставки виконано зі сплаву ВК8В, згідно ГОСТ Р 51047-97 [152] та ГОСТ Р 50300-92 [153]. Матеріал магнітів, розміщених у корпусі інструменту - 25БА170 за ГОСТ 24063-80 [153]

(феритові магніти виготовлені на основі барію). Обрано саме такий тип магнітів, так як вони витримують високу робочу температуру в 723 К (450 °С), що актуально для умов нагрівання робочого інструменту в процесі тертя при бурінні.



Рисунок 5.2 - Різець кавітаційний 1 – корпус; 2 – магніти; 3 - кожух; 4 – ріжучі кромки; 5 – дифузор кавітатора; 6 – промивний канал; 7 – твердосплавні вставки

Перевагами обраного типу магнітів є здатність зберігати магнітні властивості в умовах: механічного руйнування, зміни тиску в межах від  $1.3 \cdot 10^{-4}$  Па до 0.3 МПа та вологості до 98 %. Також вони можуть працювати в умовах механічних навантажень, оскільки характеризуються високими міцнісними властивостями (межа міцності на стиснення (180...200) МПа), що у 3-5 разів перевищують властивості литих магнітів.

Економічний ефект від впровадження ОМГК способом досягається за рахунок зниження спожитої з мережі електроенергії  $P_m$ , кВт·год, що витрачається на руйнування одиниці об'єму ГП, табл. 5.4.

Вартість електроенергії для промислових споживачів Житомирської області, до яких відноситься Товкачівський ГЗК, відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 15.08.2005 р. № 745 «Про перехід до єдиних тарифів на електричну енергію, що відпускається споживачам» постановою НКРЕКП України від 26.05.2015 р. № 1619 затвердженою у травні 2015 року – вартість 1 кВт·год/м<sup>3</sup> складає 119.48 коп. [155]. Кількість фінансових витрат на електроенергію під час буріння кварцитів Товкачівського кар'єра обертовим та ОМГК руйнуванням визначено, як добуток енергоємності руйнування (табл. 5.4) та вартості одиниці кВт·год/м<sup>3</sup> електроенергії для промислових підприємств. Результати занесені у табл. 5.5.

Таблиця 5.4 - Порівняння кількості фінансових витрат на електроенергію під час обертового та обертового магніто-гідродинамічного кавітаційного способів руйнування кварцитів

Спосіб руйнування		Кількість фінансових витрат, грн.
1		2
Обертовий		113.05
Обертовий магніто-гідродинамічний кавітаційний	V=0 мТл	109.48
	V=15 мТл	103.53
	V=30 мТл	111.86
	V=45 мТл	110.67

Таким чином, завдяки застосуванню МГК навантаження під час реалізації ОМГК руйнування ГП на кварцитовому кар'єрі Товкачівського ГЗК вдалось знизити фінансові витрати електроенергії на руйнування кварцитів зі 113.05 грн./м<sup>3</sup> до 103.53 грн./м<sup>3</sup>, тобто на 8.4 %.

Річний економічний ефект  $P_{ef}$  [156], грн./рік:

$$\begin{aligned} P_{ef} &= C_{ек} - E_n \cdot K_{доо} = (C_1 - C_2) \cdot N_p - E_n \cdot K_{доо} = \\ &= (96 - 91) \cdot 5500 - 0.15 \cdot 4100 = 26885 \approx 27000 \end{aligned} \quad (5.10)$$

де  $C_{ек}$  – річна економія витрат (собівартості одиниці продукції), грн.;

$E_n=0.15$  – показник нормативної економічної ефективності рівня віддачі капіталовкладень [156], в. о.;

$K_{доо}$  – додаткові капіталовкладення, грн.;

$C_1, C_2$  – собівартість одиниці продукції до і після впровадження запропонованого способу, грн.;

$N_p$  – річна кількість одиниць продукції, шт.

Термін окупності від впровадження запропонованого способу, місяців:

$$T_{ок} = (K_{доо} \cdot 12) / C_{ек} = (4100 \cdot 12) / 27000 = 1.82 \approx 2. \quad (5.11)$$

Зниження рівня виробничих витрат електроенергії є підставою для зниження цін на кварцити Товкачівського ГЗК, підвищення їх рентабельності та конкурентоспроможності.

## 5.4 Техніка безпеки та правила експлуатації

Під час використання різця кавітаційного перед кожною зміною машиніст повинен перевіряти закритість магнітів кожухом для уникнення небезпеки механічного руйнування магнітів та можливості ушкодження робітників їх уламками в процесі буріння.

Раз на тиждень перевіряти значення магнітної індукції у кавітаторі різця кавітаційного. У разі відхилення від норми (15 мТл) більше, ніж на 15%, демонтувати інструмент, зняти кожух та замінити магніти.



Перед заміною різця кавітаційного зупинити двигун і ввімкнути передачу у режим холостого ходу.

Під час використання різця кавітаційного всі робочі, що працюють з буровим обладнанням зобов'язані проходити додатковий інструктаж керівника робочого процесу.

Незалежно від успішності проведення робіт різцем кавітаційним повний інструктаж робітників має проводитися два рази на рік.

Проходження повторного інструктажу повинно реєструватися в «Книзі інструктування робітників з техніки безпеки», а сама книга повинна зберігатися у керівника робочого процесу (начальник загону, буровий майстер, виконроб) або ж у інженера з техніки безпеки.

Керівник робочого процесу зобов'язаний принаймні один раз на декаду перевіряти дотримання техніки безпеки на місцях, а про результати перевірки звітувати в журналі зауважень.

Перш ніж почати роботу, машиніст бурової установки повинен перевірити справність двигуна, бурового насоса, а також всіх запобіжних пристроїв бурового обладнання.

Машиніст, який здає зміну, повинен сповістити про всі виявлені в ході роботи неполадки машиніста, що приймає зміну. Крім того, всі неполадки повинні бути відзначені буровим майстром в журналі здачі-приймання зміни.

У разі виявлення найменшої небезпеки для робітників, помічник бурового майстра або сам майстер особисто зобов'язані негайно вжити заходів. Якщо ж ліквідувати небезпеку немає можливості, роботу бурового обладнання необхідно припинити, після чого евакуювати персонал в безпечне місце та негайно сповістити начальника загону, виконроба або старшого майстра.

## Висновки

1. Використанням магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження під час реалізації обертового магніто-гідродинамічного кавітаційного руйнування гірських порід на кварцитовому кар'єрі Товкачівського ГЗК знижено енергоємність руйнування кварцитів з  $95.0 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  до  $87.5 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$  (7.9 %), та фінансові витрати на електроенергію зі  $113.05 \text{ грн.} / \text{м}^3$  до  $103.53 \text{ грн.} / \text{м}^3$  (8.4 %) при магнітній індукції магнітів різця кавітаційного 15 мТл.

2. Річний економічний ефект від впровадження складає 27000 грн. на рік. Термін окупності 2 місяці.

3. За критерієм Фішера математична модель енергоємності руйнування гірських порід від значення магнітної індукції різця кавітаційного адекватна. Максимальна похибка складає 9.2 %.

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

Вирішено прикладне завдання зниження енергоємності руйнування гірських порід новим комбінованим енергозберігаючим обертовим магніто-гідродинамічним кавітаційним способом з магніто-індукційним фокусування кавітаційного потоку та інструменту для його реалізації.

Основні наукові і практичні результати полягають у наступному:

1. На основі теорії графів побудовано десятивершинний граф, який відображає новий комбінований енергозберігаючий обертовий магніто-гідродинамічний кавітаційний спосіб руйнування гірських порід з магніто-індукційним фокусування кавітаційного потоку та інструмент для його реалізації - різець кавітаційний, патент UA № 101946, МПК E21B 7/18.

2. Визначено, що питома поверхнева енергія руйнування гірських порід: спадає зі зміною магнітної індукції у дифузорі кавітатора від 0 до 15 мТл для гнейсу зі 42.99 Дж/м<sup>2</sup> до 39.53 Дж/м<sup>2</sup> та граніту з 52.43 Дж/м<sup>2</sup> до 48.71 Дж/м<sup>2</sup>.

3. Встановлено, що закономірність енергоємності руйнування від питомої поверхневої енергії під час буріння з магніто-гідродинамічним кавітаційним навантаженням спадає за логарифмічним законом: для граніту з 73 кВт·год/м<sup>3</sup> до 68 кВт·год/м<sup>3</sup> та для гнейсу з 61 кВт·год/м<sup>3</sup> до 57 кВт·год/м<sup>3</sup> зі зниженням питомої поверхневої енергії гнейсу з 42.99 Дж/м<sup>2</sup> до 39.53 Дж/м<sup>2</sup> та граніту з 52.43 Дж/м<sup>2</sup> до 48.71 Дж/м<sup>2</sup>. Це спостерігалось при магнітній індукції у дифузорі кавітатора 15 мТл, куті розкриття дифузору 60° та його довжині 30 мм.

4. Обґрунтовано раціональний режим магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаження при магнітній індукції 15 мТл, куті розкриття дифузора 60° та його довжині 30 мм, для зростання кількості локальних дефектів до 20 одиниць на 1 мм<sup>2</sup>, з середньою довжиною, шириною і глибиною відповідно 100, 10 і 5 мкм.

5. Для граніту та гнейсу модуль пружності I роду знижено зі 105.91 ГПа до 98.39 ГПа та зі 153.55 ГПа до 141.22 ГПа, відповідно, під час магніто-гідродинамічного кавітаційного навантаженні з магнітною індукцією 15 мТл.

6. Для пісковика та вапняку зі зростанням магнітної індукції від 0 мТл до 45 мТл спостерігалось зростання модуля пружності від 35.97 ГПа до 72.95 ГПа та від 51.84 ГПа до 66.25 ГПа, відповідно. Тому, використання обертового магніто-гідродинамічного кавітаційного способу руйнування для пружно-пластичних гірських порід є не доцільним.

7. Очікуваний економічний ефект від впровадження обертового магніто-гідродинамічного кавітаційного способу руйнування гірських порід з магніто-індукційним фокусуванням кавітаційного потоку в виробничих умовах ПрАТ «Товкачівський гірничо-збагачувальний комбінат» складає 27 тисяч гривень на рік. Термін окупності 2 місяці.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондаренко В. И. Технология подземной разработки пластовых месторождений полезных ископаемых [Текст]/ В. И. Бондаренко, А. М. Кузьменко, Ю. Б. Грядущий, В. А. Гайдук и другие - Днепропетровск: Полиграфист - 2003, 708 с., ISBN 966-684-085-5.
2. Бритаев В. Л. Горные машины и комплексы / В. Л. Бритаев, В. Ф. Замышляев. - М. : Недра, 1984. - 288 с.
3. Брылин В. И. Бурение скважин специального назначения [Учебное пособие] / В. И. Брылин. – Томск.: ТПУ, 2006. – 255 с.
4. Кучерявый Ф. И. Разрушение горных пород [Текст]/ Ф. И. Кучерявый, Ю. М. Кожушко. - М.: Недра, 1972. - 240 с.
5. Гидромеханический способ разрушения горных пород и его практическое использование [Электронный ресурс]/ Сайт ЗАТ «Талнах» - Режим доступа : [http://www.talnah.ru/index\\_press\\_gidro.php](http://www.talnah.ru/index_press_gidro.php) – Заголовок с экрана.
6. Основные способы разрушения горных пород [Электронный ресурс] / Сайт «Бурение скважин» - Режим доступа: <http://burenie.by/?p=257#more-257> – Заголовок с экрана.
7. Меркело А. А. Особенности и классификация невзрывных способов разрушения материалов [Электронный ресурс]/ А. А. Меркело. Режим доступа: <http://uran.donetsk.ua/~masters/publ2002/ggeo/merkelo.pdf> – Заголовок с экрана.
8. Козловская Т. Ф. Влияние поверхностно-активных веществ и их растворов на интенсивность дробления горных пород [Текст]/ В. Д. Лемижанская, Я. С. Долударева. – Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: зб. наук. праць. – Кременчук: КрНУ, Вип. 5 (82), 2013, с 124 - 129.
9. Anderson J. Discrete Mathematics with combinatorics / J. Anderson. - University of South Carolina, Spartanburg, Prentice-Hall, 2001. - p. 960. - ISBN 0-13-086998-8.

10. Допплера эффект [Электронный ресурс]/ Энциклопедия физики и техники. - Режим доступа: [http://femto.com.ua/articles/part\\_1/1127.html](http://femto.com.ua/articles/part_1/1127.html) – Заголовок з екрана.
11. Регель В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел. [Текст] / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. – Успехи физических наук, том 106, выпуск 2, 1972, с. 193 – 228.
12. Иоффе А. Ф. Деформация и прочность кристаллов [Текст] / А. Ф. Иоффе, М. Ф. Кирпичев, А. И. Левитская// Журнал русского физико-химического общества. -1924. - № 22. – с. 286-293.
13. Фем'як Я. М. Підвищення ефективності руйнування гірських порід при бурінні свердловин за рахунок енергії пульсуючих потоків: дис. к.т.н.: 05.15.10 [Текст]/ Ярослав Михайлович Фем'як. - Івано-Франківськ, 2007. - 122 с.
14. Пилипенко В. В. Экспериментальное определение длины кавитационной каверны и ее зависимости от угла диффузора трубки Вентури и режима ее работы [Текст]/ В. В. Пилипенко, И. К. Манько - Газодинамика энергетических установок. – Киев: Наукова думка, 1982. - 39-43.
15. Westwood A. R., Chemomechanic Phenomena in Hard Rock Drilling [Текст]/ A. R. Westwood, N. H. Makmillan, R. S. Kalyonen. - Trans. AJME. – 1974. Vol. 256. – p. 58-65.
16. Гершгал Д. А. Ультразвуковая технологическая аппаратура [Текст]/ Д. А. Гершгал, В. М. Фридман М: 1976. – 318.
17. Перник А. Л. Проблемы кавитации [Текст]/ А. Л. Перник. - Л. : Судостроение, 1966. – 439 с.
18. Федоткин И. М. Использование кавитации в промышленности [Текст]/ И. М. Федоткин, И. С. Гулый, Н. И. Шаповалюк. – Киев: Арктур - А, 1998. – 135 с. – ISBN 966-95344-2-9.
19. Кучеренко В. А. Энциклопедия современной техники. Строительство [Текст]/ В. А. Кучеренко. - М.: Советская энциклопедия, 1964. - 544 с.

20. Козлов В. И. Ларморова прецессия [Текст]/ В. И. Козлов - Лабораторный практикум по общей физике. Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2006. – 14 с.

21. Сиденко П. М. Измельчение в химической промышленности [Текст]/ П.М. Сиденко. – М.: Химия, 1977 – 356 с.

22. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids [Text]/ A. A. Griffith. - Philosophical Transaction of the Royal Society of London. Series A, vol. 221 – 1921. - pp 163-198.

23. Irvin G. R. Fracture [Текст]/ G. R. Irvin. - Springer encyclopedia of physics, vol. 6, 1958. - pp. 551-590.

24. Партон, В. З. Механика разрушения от теории к практике [Текст]/ В.З. Партон. - М. : Наука, 1990. – 240 с. (Проблемы науки и технического прогресса) - ISBN 978-5-382-00157-9.

25. Журков С. Н. О прогнозировании разрушения горных пород [Текст] / С. Н. Журков, В. С. Куксенко, В. А. Петров и др. - Изв. АН СССР, серия Физика земли № 6, 1977 г., 8 с.

26. Пестриков В. М. Механика разрушения твердых тел [Текст]/ В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. - Санкт-Петербург : Профессия, 2002. – 300 с. - ISBN: 5-93913-022-4.

27. Морозов Е. М. Механика деформируемых тел и конструкций [Текст]/ Е. М. Морозов. - М. : Машиностроение – 1975, 476 с.

28. Irvin G. Analysis of Stresses and Straines Near the End of Crack Traversing a plate [Текст]/ G. Irvin. - J. Appl. Mech., Vol. 24, № 3 - 1957, p. 361-364.

29. Обреимов И. В. О прочности слюды на разрыв по плоскости спайности. Исследования по экспериментальной и теоретической физике (памяти О. Ландсберга) [Текст]/ И. В. Обреимов, Е. С. Терехов// М.: Изд. АН СССР, 1959. – 159 с.

30. Orowan E. Fracture and strength of solids [Текст]/ E. Orowan. - Reports Progn. Phys. - № 12, 1948. - P. 185-232.

31. Владимиров В. И. Физическая теория прочности и пластичности металлов [Текст]/ В. И. Владимиров. – М.: ЛПИ, 1975. – 206 с.
32. Яковлев П. В. Обоснование критерия прочности при расчетах зубчатых передач [Текст]/ П. В. Яковлев. - Казанская наука, №4, 2010. - с. 16 - 22. - ISSN 2078-9955.
33. Гарипов Т. Т. Моделирование процесса гидроразрыва пласта в пороупругой среде [Текст]/ Т. Т. Гарипов. - Математическое моделирование, том 18, №6, 2006. - с. 53-69.
34. Горюнов Ю. В. Скачкообразный рост трещин в монокристаллах при растяжении в контакте / Ю. В. Горюнов, Г. И. Деньщиков, Л. С. Солдатенкова, Б. Д. Сумм. - ДАН СССР, том 24, №2, 1978. – с. 327 - 329.
35. Вакуленко А. А. О распространении трещин в полимерах [Текст]/... А. А. Вакуленко. - Механика эластомеров, том 2, выпуск 268, 1978. – с. 5 - 12.
36. Кичигин А. Ф. Основы функционирования системы забой – горная машина [Текст] / А. Ф. Кичигин, О. М. Терентьев. - К.: УМК ВО, 1989. – 223 с.
37. Смирнов Б. С. Кластеры с плотной упаковкой [Текст]/ Б. С. Смирнов - Успехи физических наук, том 162 - № 1, 1992. - С. 119-138.
38. Смирнов Б. М. Скейлинг в атомарной и молекулярной физике [Текст]/ Б. М. Смирнов. - Успехи физических наук, том 171 - № 12, 2001. - с. 1291-1315.
39. Странский И. Н. К теории роста кристаллов и образования кристаллических зародышей [Текст]/ И. Н. Странский, Р. Каишев. - Успехи физических наук, том 21, № 4, 1939. - с. 408 – 465.
40. Gilliman J. J. Dislocation dynamics and the response of material to impact [Текст]/ J. J. Gilliman - Appl. Mech. Rev. 1968. V. 21. No. 8. P. 767 – 783.
41. Терентьев О. М. Класифікація комбінованих способів руйнування гірських порід графами [Текст]/ О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. – Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: зб. наук. праць. – Кременчук: КрНУ, Вип. 2 (12), 2013. - С. 74 - 80.



42. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений [Текст]/ Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 278 с.
43. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов [Текст]/ Д. Финни; под. ред. академика Ю. В. Линника - М.: 1970 г. - 287 с.
44. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов [Текст]/ А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.
45. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии [Текст]/ А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.
46. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке [Текст]/ Н. Джонсон, Ф. Лион; под ред. к.т.н. Э.К. Лецкого, д.т.н. Е.В. Марковой. - М. : Мир – 1981 г. - 516 с.
47. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов [Текст]/ К. Хартман, Э. К. Лецкий, В. Шеффер; под ред. к.т.н. Э. К. Лецкого. - М.: Мир, 1977. - 552 с.
48. Жирабок А. Н. Планирование эксперимента для построения математических моделей [Текст]/ А. Н. Жирабок. Соросовский образовательный журнал, том 7, № 9, 2001. – с. 121-127.
49. Аністратенко В. О. Математичне планування експериментів в АПК: [Текст]/ В. О. Аністратенко, В. Г. Федоров. - К.: Вища школа, 1993. - 375 с., ISBN 5-11-002551-1.
50. ГОСТ 50864-96. Резьба коническая замковая для элементов бурильных колонн. Профиль, размеры, технические требования. – М.: Госстандарт России, 1996. – 15 с.
51. Выпрямитель ВСА-5К [Электронный ресурс]/ Сайт «Специальные технические системы» - Режим доступа: [http://www.bm7.ru/view\\_pribor-temp2.php?id=800](http://www.bm7.ru/view_pribor-temp2.php?id=800) – Заголовок з екрану.

52. Тесламетр магнитометр [Електронний ресурс]/ Сайт «Магниты неодимовые» - Режим доступа: <http://magnet34.ru/teslametr.html>– Заголовок з екрану.

53. ГОСТ 24936-89. Магниты постоянные для электротехнических изделий. Общие технические требования. – М. : Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1989. – 24 с.

54. ГОСТ Р 51047-97. Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие технические условия. - М.: Госстандарт России, 1998 - 25 с.

55. ГОСТ Р 50300-92. Резцы токарные со сменными режущими пластинами из сверхтвердых материалов. Технические условия. - М.: Госстандарт России, 1994 – 11 с.

56. Булгаков А. Б. Улучшение свойств жидких топлив гидромеханической обработкой в кавитационном поле [Текст]/ А. Б. Булгаков. М.: Недра, 1996. — 193с. ISBN 5-247-03495-3.

57. Иванов В. М. Парогазовые процессы и их применение в народном хозяйстве [Текст] / В. М. Иванов. – М.: Наука, 1970. – 320с.

58. Штеренлихт Д. В. Гидравлика [Текст]/ Д. В. Штеренлихт – М.: Энергоатомиздат, книга 1, 1995. – 351 с.

59. Скирденко О. І. Визначення кількості дубльованих дослідів при дослідженні міцності епоксидокомпозитного з'єднання деталей машин [Текст]/ О. І. Скирденко. - Науковий вісник ХДМІ №2 (5), 2011. - 278-283 с.

60. Бобилев В.П. Основы научных исследований [Текст]/ В. П. Бобилев, І.І. Иванов, Я. В. Стовба. - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2010. – 48 с.

61. Терентьев О. М. Планування експериментальних досліджень зміни питомої поверхневої енергії гірських порід при руйнуванні обертово-гідрокавітаційним способом [Текст]/ О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - Энергетика: економіка, технології, екологія, 2014. – с. 77-84.

62. Горюнов Ю. В. Скачкообразный рост трещин в монокристаллах при растяжении в контакте [Текст]/ Ю. В. Горюнов, Г. И. Деньщиков, Л. С. Солдатенкова, Б. Д. Сумм. - ДАН СССР, том 24, №2, 1978. - с. 327 - 329.

63. Шаскольская М. П. Кристаллография [Текст]/ М. П. Шаскольская. - М.: Высшая школа, 1984. - 376 с.

64. Кривцов А. М. Метод частиц и его использование в механике деформируемого твердого тела [Текст]/ А. М. Кривцов, Н. В. Кривцова. - Дальневосточный математический журнал ДВО РАН, том 3, № 2, 2002. - с. 254 - 276.

65. Сумм Б. Д. Новые корреляции поверхностного натяжения с объемными свойствами жидкостей [Текст] / Б. Д. Сумм. - Вестник Московского Университета, серия «Химия», том 40, № 6, 1999. - с. 400 – 405.

66. Кравцов А. М. О механических характеристиках наноразмерных объектов [Текст]/ А. М. Кравцов, Н. Ф. Морозов. - Фізика твердого тела, том 44, № 12, 2002. - с. 2158-2163.

67. Терентьев О. М. Фізико-технічні основи видобутку корисних копалин з енергоощадним руйнуванням молекулярних зв'язків гірських порід: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. Наук : спец. 05.15.03 «Відкрита розробка родовищ корисних копалин» [Текст] / Терентьев Олег Маркович; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут».- Київ, 2008. – 38 с.

68. Спиридонов О. П. Фундаментальные физические постоянные [Текст] / О. П. Спиридонов. – М.: Высшая школа, 2001. - 238 с.

69. Терентьев О. М. Урахування міцності молекулярних зв'язків гірських порід при виборі робочих органів для її руйнування [Текст] / О. М. Терентьев. - Вісник НТУУ «КПІ», серія «Гірництво», 2010, № 19.

70. Кичигин А. Ф. Основы функционирования системы забой – горная машина [Текст] / А. Ф. Кичигин, О. М. Терентьев. - К.: УМК ВО, 1989. – 223 с.

71. Боброва М. Е. Моделирование поля деформаций и зон дилатансии в упругом полупространстве с комбинацией двойных сил [Текст] / М. Е. Боброва, А. С. Пережогин. - Вестник КРАУНЦ, Физ.-мат. науки, № 1(2), 2011. - с. 31-36.

72. Гарбер Р. И. Физика прочности кристаллических тел [Текст] / Р. И. Гарбер, И. А. Гиндин. - Успехи физических наук, том 80, № 1, 1960. - с. 57-106.

73. Протасов Ю. И. Разрушение горных пород [Текст]/ Ю.И. Протасов. - М.: Горная книга, 2009. - 453 с.

74.

75. Пилипенко А. Т. Справочник по элементарной химии [Текст] / А. Т. Пилипенко, В. Я. Починок, И. П. Середа, Ф. Д. Шевченко. – К.: Наукова думка, 1985. –560с.

76. Расчёт магнитной индукции катушки [Электронный ресурс]/ Сайт «Электротехника» - Режим доступа: [http://electe.blogspot.com/2011/07/blog-post\\_27.html](http://electe.blogspot.com/2011/07/blog-post_27.html) - Заголовок з екрану.

77. Магнитная постоянная [Электронный ресурс]/ Сайт «Вікіпедія» - Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная постоянная](http://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитная_постоянная). - Заголовок з екрану.

78. Магнетон Бора [Электронный ресурс] / Сайт «Вікіпедія» - Режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Магнетон Бора](http://ru.wikipedia.org/wiki/Магнетон_Бора). - Заголовок з екрану.

79. Рогальський Б.С. Контроль електроспоживання гірничих машин і технологічних властивостей гірських порід [Текст]/ Б.С. Рогальський, Ю.П. Войтюк. - Вінниця: Універсум, 2009. - 81 с. - ISBN 978-966-641-298-3.

80. Булгаков А. Б. Улучшение свойств жидких топлив гидромеханической обработкой в кавитационном поле [Текст] / А. Б. Булгаков. — М.: Недра, 1996. — 193 с. — ISBN 5-247-03495-3.

81. Иванов В. М. Парогазовые процессы и их применение в народном хозяйстве [Текст] / В. М. Иванов. — М: Наука, 1970. — 320с.

82. Витікання рідини із отворів і насадок [Електронний ресурс]/ Гідрогазодинаміка в прикладах. — Режим доступу: [http://posibnyky.vntu.edu.ua/gidro\\_gazo\\_dunamika/page42.html](http://posibnyky.vntu.edu.ua/gidro_gazo_dunamika/page42.html). - Заголовок з екрану.

83. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы [Учебник] / Т.М. Башта, С. С. Руднев, Б. Б. Некрасов. – М. : Машиностроение, 1982. – 424 с.

84. Повх И.Л. Техническая гидромеханика [Текст] / И.Л. Повх. - Л. : Машиностроение, 1976 г. - 504 с.

85. Пилипенко В. В. Кавитационные автоколебания [Учебное пособие] / В. В. Пилипенко. – К.: Наукова думка, 1989. – 316 с.

86. Гейер В. Г. Гидравлика и гидропривод [Учебник для ВУЗов - 3-е издание] / В. Г. Гейер, В. С. Дулин, А. Н. Заря. - М. : Недра, 1991. – 331 с.

87. Терентьев О. М. Поверхностная энергия горных пород [Текст]/ О. М. Терентьев, И. Н. Стрельцова. - Проблемы недропользования. Международный форум-конкурс молодых ученых: Сб. науч. Трудов. Часть 1. 24-26 апреля 2013 г. – Санкт-Петербург : Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». С. 195-197.

88. Терентьев О. М. Выбор параметров управления удельной поверхностной энергией разрушения горных пород [Текст]/ О. М. Терентьев, И. М. Стрельцова. - Перспективы развития горного дела и подземного строительства: материалы V междунар. науч.-техн. конф. «Энергетика. Экология. Человек», 23 – 24 мая 2013 г. Вып. № 4. - К. : НТУУ «КПИ». - С. 188-192.

89. Терентьев О. М. Математична модель управління питомою поверхневою енергією руйнування гірських порід [Текст]/ О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського: зб. наук. праць. – Кременчук : КрНУ, 2013. - Вип. 3 (80). – С. 153-157.

90. Терентьев О. М. Geometrical and frequency parameters of rotaryhydrocavitation work instrument's pulse generation [Текст]/ О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - Theoretical & Applied Science. Materials of the International Scientific Practical Conference 28.02.2014. Shveden, Linkoping. – P. 54 - 59.

91. Терентьев О. М. The energy intensity of rock breaking by mechanik-hydrocavitation method [Текст]/ О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - Theoretical & Applied Science. Materials of the International Scientific Practical Conference 30.12.2013. Serbia, Neoplanta. – P. 22 - 26.

92. Мельников Н. В. Справочник (Кадастр) физических свойств горных пород. [Текст]/ Под редакцией Н. В. Мельникова, В. В. Ржевского, М. М. Протодяконова. – М.: Недра, 1975. – 279 с.

93. LZS - 2 станок для изготовления кругло-фасонных изделий [Электронный ресурс]/ Сайт «Канатные машины SZJ mini» - Режим доступа: <http://www.cubimport.com.ua/oborudovanie/oborudovanie-dlya-izgotovleniya-fasonnyh-izdeliy/lzs-2-stanok-dlya-izgotovleniya-kruglo> – Заголовок з екрану.

94. Мостовой станок для шлифовки и полировки гранита, мрамора QM300X110/300X130. [Электронный ресурс]/ Сайт «allbiz» - Режим доступа: <http://191117.ru.all.biz/> – Заголовок з екрану.

95. Водопьянов В. И. Упругие свойства металлов [Текст]. Методические указания к лабораторной работе/ В. И. Водопьянов, О. В. Кондратьев, А.А. Белов. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2010. - 16 с.

96. Корисні копалини України [Электронный ресурс]/ Сайт «Вікіпедія» - Режим доступа: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Корисні\\_копалини\\_України](http://uk.wikipedia.org/wiki/Корисні_копалини_України) – Заголовок з екрану.

97. Месторождения Украины. Капустинское месторождение гранита [Электронный ресурс]/ Сайт «Компания Сити камень» - Режим доступа: <http://citystone.su/?level=2&id=5> – Заголовок з екрану.

98. Арсланова Х. А. Геологический словарь [Текст]: Т. 2 Н-Я / Х. А. Арсланова, М. Н. Голубчина, А. Д. Искандерова и др.; под ред. К. Н. Паффенгольца. — М.: Недра, 1978. – 456 с.

99. Кнунянц И. Л. Химическая энциклопедия [Текст] Т. 2. / И. Л. Кнунянц. — М.: Советская энциклопедия, 1990. — 673 с.

100. Кнунянц И. Л. Химическая энциклопедия [Текст] Т. 4. / И. Л. Кнунянц. - М.: Советская энциклопедия, 1995. — 641 с.

101. Биотит [Электронный ресурс]/ Сайт «Каталог минералов» - Режим доступа: <http://www.catalogmineralov.ru/> – Заголовок з екрану.

102. Кучеренко В. А. Энциклопедия современной техники. [Текст]. Т. 1 Строительство / В. А. Кучеренко. М.– Советская энциклопедия, 1964. - 562 с.

103. Технологія видобування вапняку [Електронний ресурс]/ Сайт «Українська асоціація вапняної промисловості» - Режим доступу: <http://limeindustry.in.ua/uk/analytics/show/4> – Заголовок з екрану.

104. Песчанник [Електронний ресурс]/ Сайт «Горная энциклопедия» - Режим доступу: <http://www.mining-enc.ru/p/peschanik/> – Заголовок з екрану.

105. Арцимович Л. А. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях/ Л. А. Арцимович, С. Ю. Лукьянов [Текст]/ М.: Наука, 1978. - 224 с.

106. Ланге В. Н. Физики и физические явления [Текст]/ В. Н. Ланге, под. редакцией академика АН МССР С. И. Радауцана // Кишенев – Штиинца, 1985, 127 с.

107. Кнэпп Р. Кавитация [Текст]/ Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит. - М.: Мир, 1974. - 678 с.

108. Пирсол И. Кавитация [Текст]/ И. Пирсол. - М.: Мир, 1975. - 96 с.

109. Oliver W. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [Текст]/ W. Oliver, G. Pharr / - Journal of materials research. – Vol. 7, № 6, 1992. – pp. 1564 - 1583.

110. Звіт про геологічне вивчення надр пісковиків Ямпільського району Вінницької області. [Електронний ресурс]/ Сайт «Песчанник» - Режим доступу: <http://www.peschanik.com/kharakteristika-kamnya.html> – Заголовок з екрану.

111. Серeda Н. Г. Бурение нефтяных и газовых скважин [Підручник] / Н. Г. Серeda, Е. М. Соловьев// М.- Недра, 1974 г., 456 с.

112. Опыт эксплуатации установки измерения скорости УЗК «УИСУ-01» [Електронний ресурс]/ Сайт «ОКО» Ассоциация - Режим доступу: <http://ndt.com.ua/support/standardization/uisu-01> – Заголовок з екрану.

113. Дортман Н. Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. [Текст]/ Н. Б. Дортман. - М.: Недра, 1964. - 325 с.

114. Головин Ю. И. Магнитоупругость твердых тел [Текст]/ Ю. И. Головин. - Физика твердого тела, Т. 46, вып. 5, 2004. - с. 769-803.

115. Закупин А. С. Особенности спектров и параметров потока акустоэмиссионных сигналов при воздействии электромагнитного поля на нагруженные образцы [Текст]/ А. С. Закупин, Л. М. Богомолов, Г. С. Закупина, В. А. Мубассарова и др. Петропавловск-Камчатский, ИКИР ДВО РАН, 2007. - с. 84- 90.
116. Олейнич-Лысюк А. В. Особенности магнитоэластического эффекта в бериллиевом конденсате [Текст]/ А.В. Олейнич-Лысюк, Н.Д. Раранский. - Физика твердого тела. Т. 54, Вып. 3, 2012. – с. 417 - 421.
117. Альшиц В. И. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля [Текст] /В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, Т. М. Перекалина и др. – ФТТ, № 2, 1987. – с. 467–471.
118. Даринская Е. В. Магнитоэластический эффект: основные свойства и физические механизмы, диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук: 01.04.07 [Текст]/ Елена Владимировна Даринская, 2004. - 280 с.
119. Федоткин И. М. Кавитация. Кавитационная техника и технология, их использование в промышленности. Часть I [Текст]/ И. М. Федоткин, И. С. Гулый// К.: Полиграфкнига, 1997. - 840 с.
120. Федоткин И. М. Роль электронного потенциала в зарождении паровой фазы на металлических поверхностях [Текст]/ И. М. Федоткин, Ю. И. Федоткин// Киев – Наукова думка, сборник «Конвективный перенос», 1982. - с. 105 – 110.
121. Френкель Я. И. Об электрических явлениях, связанных с кавитацией, обусловленной ультразвуковыми колебаниями в жидкости [Текст]/ Я. И. Френкель. - Журнал физической химии, Т. 14, вып. 3, 1940. - с. 305 - 308.
122. Frenkel J. On electrical phenomena associated with cavitation due to ultrasonic vibrations in liquids [Текст]/ J. Frenkel. - Acta physicochimica URSS. - Vol. 12, No 31, 1940. - P. 317 - 322.
123. Классен В. И. Омагничивание водных систем [Текст]/ В. И. Классен. - М.: Химия, 1982. - 296 с.



124.Класен В. И. Вода и магнит [Текст]/ В. И. Класен. - М.: Наука, 1973.– 111 с.

125. Бондаренко Н. Ф. Электромагнитные явления в природных водах [Текст] / Н. Ф. Бондаренко, Е. З. Гак. - Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 152 с.

126. Terentev O. Geometrical and frequency parameters of rotaryhydrocavitation work instrument's pulse generation [Text] / O. Terentev, I. Streltsova - Theoretical & Applied Science. Materials of the International Scientific Practical Conference 28.02.2014. Shveden, Linkoping.

127. Gilman J. Direct measurements of the surface energies of crystals [Текст]/ J. Gilman// J. Appl. Phys. 31 (2), 1960. - 2208 – 2216 p.

128. Моргунов Р. Б. Магнитопластичность и магнитная память в диамагнитных твердых телах / Р. Б.Моргунов, А. Л. Бучаченко // ЖЭТФ, том 136, выпуск 3(9), 2009, с. 505-515.

129. Петров В. А. Физические основы промышленной безопасности [Текст]/ В. А. Петров. - Санкт-Петербург: Наука и техника, 2005, №9, с. 17-19.

130. Адамова Л. В. Процессы на поверхности раздела фаз [Текст]/ Л.В. Адамова - Екатеринбург, Уральский государственный университет им. А. М. Горького, конспект лекций, 2007. - 125 с.

131. Terentiev O. Mechanism of creating the prefracture zone of rock formations with magnetic and hydrocavitation load [Text] / O. Terentiev, I. N. Streltsova, A. J. Kleshchev - Metallurgical and Mining industry, ISSN 2076-0507, Dnipropetrovsk, No. 4, 2015, pp 353-355.

132. Терентьев О. М. Ослаблення масиву гірських порід магніто-гідрокавітаційним навантаженням [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова, М. І. Закієв. - Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва: зб. наук. праць. ISSN 2074-1537 – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип 1/2015 (15). – с. 18-24.

133. Терентьев О. М. Зниження енергоємності руйнування гірських порід за рахунок використання енергії прецесуючого кавітаційного потоку [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - Сталий енергетичний розвиток: сучасні

тенденції, технології та рішення. Збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної та навчально-методичної конференції 24.09.2014. К.: Національний технічний університет України «КПІ», с 52.

134. Терентьев О. М. Комбінований енергозберігаючий обертово-гідрокавітаційний спосіб руйнування гірських порід [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - II Аспірантські читання пам'яті Праховника А. В. 16-17 квітня, 2014, К. - Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ», с. 29-30.

135. Терентьев О. М. Питома поверхнева енергія, як один з ключових параметрів руйнування гірських порід [Текст] / О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова. - Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина». Інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «КПІ», Київ, 2015, с 414-418.

136. Мусанов А., Буровое оборудование компании Атлас Копко [Текст]/ А. Мусанов, А. Шалбай. – Алматы, 2005. - 130 с.

137. Волков А. С. Вращательное бурение разведочных скважин [Текст]/ А.С. Волков. - М: Недра, 1988. - 320 с.

138. Кузнецова Е. В. Математическое планирование эксперимента [Текст]/ Е. В. Кузнецова. Пермь, 2011. - 33 с.

139. ГОСТ 33213-2014 Контроль параметров буровых растворов в промысловых условиях. Растворы на водной основе. Москва: Стандартинформ. – 2014. - 127 с.

140. ГОСТ 25795-83 Сырье глинистое в производстве глинопорошков для буровых растворов. Москва: Издательство стандартов, 2009, 5 с.

141. ГОСТ 8433-81 Вещества вспомогательные ОП-7 и ОП-10. Технические условия. Москва: Издательство стандартов, 1981. - 16 с.

142. Шамов Н. А. Волновые процессы в технологии приготовления буровых растворов [Текст]/ Н. А. Шамов, В. Ю. Артамонов. - М.: Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», №3, 2013. - с. 56 - 65.

143. Вязкость воды [Электронный ресурс]/ Сайт «Аналитическая химия» - Режим доступа: <http://www.novedu.ru/sprav/vis-h2o.htm> – Заголовок з екрану.

144. Темам Р. Уравнения Навье — Стокса. Теория и численный анализ. [Текст]/ Р. Темам. — М.: Мир, 1981. - 408 с.

145. Poritsky H., The collapse or growth a spherical bubble or cavity in a viscous fluid [Текст]/ Proc. First U. S. Natl. Congr. Appl. Mech. (ASME), pp. 813-821, 1952.

146. Ибрагимов Л. Х. Теория и практика применения, затопленных скоростных турбулентных струй и вскипающих адиабатных потоков для воздействия на призабойные зоны скважин [Текст]/. Л. Х. Ибрагимов. М.: ВНИИОЭНГ, 1977. - 112 с.

147. Ржевский В. В. Основы физики горных пород [Текст]/ В. В. Ржевский, Г. Я. Новик. – М.: Недра, 1978. – 390 с.

148. Ваттметр Д 365 [Электронный ресурс]/ Сайт «ФЛП Котляров С. С.» - Режим доступа: <http://rele.in.ua/index.php/tovar/elektroizmeritelnye-pribory/d365/d365-60kvt-detail.html> – Заголовок з екрану.

149. ГОСТ 8.286-78 Государственная система обеспечения единства измерений. Секундомеры электрические. Методы и средства поверки. Москва: Издательство стандартов, 1978. – 6 с.

150. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика [Текст]/ А. И. Кобзарь — М.: Физматлит, 2006. — 816 с.

151. ГОСТ 4543-71 Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. Москва: Издательство стандартов, 1971. – 40 с.

152. ГОСТ Р 51047-97 Резцы для очистных и проходческих комбайнов. Общие технические условия. Москва: Госстандарт России, 1997. – 20 с.

153. ГОСТ Р 50300-92 Резцы токарные со сменными режущими пластинами из сверхтвердых материалов. Технические условия. Москва: Госстандарт России, 1992. – 46 с.

154. ГОСТ 24063-80 Ферриты магнитотвердые. Марки и основные параметры. Москва: Издательство стандартов, - 1980. - 14 с.

155. Тарифи на електричну енергію [Електронний ресурс]/ Сайт «Житомиробленерго». - Режим доступу: <http://www.ztoe.com.ua/tariff.php>.

156. Богдан Н. М. Інноваційний менеджмент [Текст]/ Н. М. Богдан// Х. – Харківська національна академія міського господарства, Методичні вказівки - 2012 р. - 20 с.

157. Терентьев О. М. Энергоемність та питома поверхнева енергія руйнування гірських порід магніто-гідрокавітаційним навантаженням [Текст]/ О. М. Терентьев, І. М. Стрельцова// Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Гірництво", Вип. 28, 2015 р.– с. 29 – 35с.

## ДОДАТОК А

### Акт впровадження обертowego магніто-гідродинамічного кавітаційного способу руйнування гірських порід

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Генеральний директор  
ПРАТ «Товкачівський ГЗК»  
Савчук Володимир Петрович

\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

#### АКТ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 р.

м. Овруч

впровадження результатів дисертаційного дослідження Стрельцової Ірини Миколаївни на тему: «Керування питомою поверхневою енергією руйнування гірських порід механіко-гідрокавітаційним навантаженням».

Комісія у складі:

від ПРАТ «Товкачівський» генеральний директор Савчук В. П. (голова комісії), головний інженер Бирковський М. О.;

від Національного технічного університету України «КПІ» ІЕЕ д. т. н., проф. Терентьев О. М., аспірант Стрельцова І. М.

цим актом засвідчує, що запропонований в дисертаційному дослідженні Стрельцової І. М. спосіб зниження енергоємності руйнування гірських порід за рахунок ослаблення молекулярних зв'язків під дією субрезонансних явищ використано для впровадження нової технології та обладнання руйнування гірських порід комбінованим механіко-гідрокавітаційним навантаженням.

Суть технології полягає у зменшенні опору різання порід. Це здійснюється шляхом внесення штучної та ініційованні зростання природної тріщинуватості прещесуючим кавітаційним потоком промивної рідини. На основі наукових положень, висновків та рекомендацій дисертації Стрельцової І. М. розроблено та впроваджено систему енергоощадного руйнування гірських порід механіко-гідрокавітаційним навантаженням.

При впровадженні результатів дослідження досягнуто технічний ефект, по зниженню енергоємності руйнування до 10 %.

Річний економічний ефект від впровадження механіко-гідрокавітаційного способу руйнування гірських порід досягає близько 22000 грн. Економічний ефект буде уточнюватись протягом трьох наступних років, починаючи з 2015.

Даний акт складено у 2 примірниках.

Цей акт не є підставою щодо взаємних фінансових розрахунків.

Голова комісії:

Савчук О.П.

(підпис)

Члени комісії:

Бирковський М.О.

(підпис)

Терентьев О. М.

(підпис)

Стрельцова І. М.

(підпис)

Монографія

**РЕЗОНАНСНЕ ЕНЕРГООЩАДНЕ  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

**ТОМ 1  
ОБЕРТОВЕ МАГНІТО-ГІДРОДИНАМІЧНЕ  
КАВІТАЦІЙНЕ РУЙНУВАННЯ ВИБОЇВ**

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київського політехнічного інституту імені Ігоря Сікорського»  
(протокол № 5 від 14 травня 2018)*

Підписано до друку 17.05.2018 Формат 60х84 1/16  
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура: Times.  
Ум. друк. арк. 8,72. Тираж 100 прим.

Видавництво «Вік принт»  
вул. Кулібіна, 11-а, оф. 204, м.Київ, 03062  
тел./факс: 206-08-57

Свідоцтво про внесення до Держреєстру  
серія ДК № 4650 від 06.11.2013 р.



**ТЕРЕНТЬЄВ Олег Маркович** – д.т.н., професор кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв КПІ ім. Ігоря Сікорського. Нагороджений знаками «Відмінник освіти України» та «Викладач-дослідник». Засновник наукового напрямку «Фізико-технічні основи керування внутрішнім потенціалом середовищ». Підготував 5 кандидатів технічних наук. Опубліковано понад 250 наукових робіт, 32 патенти.



**КЛЕЩОВ Антон Йосипович** – PhD, лауреат премії Верховної ради України в галузі фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних розробок. Автор 30-ти наукових робіт, серед яких 3 патенти та 2 статті, що включені до бази Scopus.



**ГОНТАРЬ Павло Анатолійович** – PhD, призер міжнародного форуму-конкурсу «Проблеми надрокористування». Автор 14 наукових робіт, серед них 1 патент на винахід.



**ТВЕРДА Оксана Ярославівна** – к.т.н., старший викладач кафедри інженерної екології КПІ ім. Ігоря Сікорського. Автор понад 40 наукових праць, серед них 1 монографія, 3 патенти на корисну модель, 10 статей опублікованих у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, в тому числі Scopus. Результати досліджень представлені та апробовані більш ніж на 20 наукових конференціях.